

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**EFFECTO DE LOS ÓXIDOS METÁLICOS SOBRE LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS DEL BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DE AGUAS
RESIDUALES**

Por

I.Q. BRAYAN STEVEN MORENO CABALLERO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN PROCESOS SUSTENTABLES**

Dr. JOSÉ JULIÁN CANO GÓMEZ
Asesor

Julio, 2020

**EFFECTO DE LOS OXIDOS METÁLICOS SOBRE LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO A PARTIR DE AGUAS
RESIDUALES**

Aprobación de tesis:

Dr. José Julián Cano Gómez.

Presidente

Dr. Iván Alonso Santos López

Secretario

Dr. Héctor Javier Amézquita García

Vocal

Dra. María Elena Cantú Cardenas.

Sub-directora de estudios de posgrado.

MONTERREY, NUEVO LEÓN, JULIO 2020

**EFFECTO DE LOS ADITIVOS EN BASE METÁLICA SOBRE LAS
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO A PARTIR
DE AGUAS RESIDUALES**

Revisión de tesis:

Dr. José Julián Cano Gómez.

Asesor

Dr. Iván Alonso Santos López

Comité

Dr. Héctor Javier Amézquita García

Comité

M.C. Jesús Manuel Zaragoza García

Comité

MONTERREY, NUEVO LEÓN, JULIO 2020

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fuerza, paciencia, sabiduría y comprensión para continuar día tras día.

A mi mamá Nancy y mi hermano Michael por todo el amor y el apoyo que siempre me han brindado.

A mis abuelas, tías, tíos y padrinos por siempre estar junto a mí en todos los momentos de mi vida y por ser un constante ejemplo de honestidad y trabajo duro.

A mis amigos Santiago, Tatiana V, Evelin, Aldo, Brenda y Eli quienes se han convertido en una segunda familia en México.

A todos aquellos amigos que se encuentran en Colombia y otros lugares del mundo como Edith, Pao, José, Sergio P, Nicolás, Nathalie, Lina, Tatiana G, Tatiana A, Jonathan, Sol, Sergio O, Sergio M y Diego quienes nunca se han apartado de mi vida pese a la distancia, muchas gracias por su constante apoyo y amistad incondicional.

A mis amigos y compañeros de generación de maestría Sofía, Alondra, Neri, Alex y Marisol por su gran amistad, los ánimos de todos los días y las risas que nunca faltaron.

Al Dr. José Julián Cano por su paciencia, apoyo y dirección durante los últimos dos años.

A mi comité tutorial conformado por el doctor Iván Santos, el doctor Héctor Amézquita y el maestro Jesús Zaragoza por todos sus aportes y colaboración a la realización de este proyecto.

A Conacyt por la beca otorgada.

DEDICATORIA

A mi padre Julio Ernesto (Q.E.P.D.) quien siempre fue un gran admirador de la cultura mexicana y quien estaría muy orgulloso de verme progresar en su México lindo y querido, la tierra de sus amadas rancheras.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	VII
DEDICATORIA.....	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS	XIV
RESUMEN.....	VII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
3. APORTACIÓN CIENTÍFICA.....	9
4. HIPÓTESIS.....	9
5. OBJETIVOS	10
5.1. General.....	10
5.2. Específicos	10
METODOLOGÍA.....	11
5.1. Materiales y equipo de laboratorio.....	11
5.2. Desarrollo Experimental.....	12
5.2.1. Etapa 1: Preparación del catalizador heterogéneo (CaO) para la reacción de transesterificación.	13
5.2.2. Etapa 2: Extracción de aceite graso.....	13
5.2.3. Etapa 3: Producción y caracterización de biodiésel	14
5.2.4. Etapa 4: Implementación de aditivos en biodiésel.....	19
6. RESULTADOS	22
6.1. Etapa 1. Preparación del catalizador heterogéneo (CaO) para la reacción de transesterificación.	22
6.2. Etapa 2. Obtención del aceite residual a partir de lodos residuales de la planta noreste de agua y drenaje de Monterrey	23

6.3. Etapa 3. Producción y caracterización de biodiésel.....	24
6.3.1. Producción de biodiésel	24
6.3.2. Caracterización del biodiésel	26
6.4. Etapa 4. Implementación de aditivos	28
6.4.1. Síntesis de aditivos.	28
6.4.2. Determinación experimental de propiedades fisicoquímicas a mezclas de biodiésel-óxido de magnesio.	31
6.4.2.1. Viscosidad cinemática	32
6.4.2.2. Densidad	38
6.4.2.3. Índice de refracción	41
6.4.3. Determinación experimental de propiedades fisicoquímicas a mezclas de biodiésel-óxido de manganeso.	45
6.4.3.1. Viscosidad cinemática	45
6.4.3.2. Densidad	50
6.4.3.3. Índice de refracción	53
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de etapas de la investigación	11
Figura 2. Diagrama de flujo de la etapa 1	13
Figura 3. Diagrama de flujo de la etapa 2	14
Figura 4. Diagrama de flujo de la etapa 3	15
Figura 5. Diagrama de flujo de la etapa 4	21
Figura 6. Difractograma de rayos X de muestra de CaO obtenido a partir de cáscara de huevo.....	22
Figura 7. Separación de fases al final del proceso de baño ácido	23
Figura 8. Cambio de aspecto de la grasa durante el proceso de extracción (a: Grasa después del filtrado; b: Grasa después del baño ácido; c: Grasa después de la extracción soxhlet)	24
Figura 9. Rendimiento de la esterificación a diferentes condiciones de tiempo, relación molar metanol:grasa y cantidad de catalizador.	25
Figura 10. Difractograma de rayos X para 4 muestras de óxido de magnesio obtenidas por método térmico a 500, 600 y 700° y por método hidrotérmico a una concentración de solvente de 0.1 M	29
Figura 11. Transición de fase cristalina del óxido de manganeso entre temperaturas de 850°C y 950°C	31
Figura 12. Viscosidad cinemática de mezclas biodiésel-MgO a 40°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.....	32
Figura 13. Viscosidad cinemática de mezclas Biodiésel-MgO (49.7 nm – 9.3 µm) con variaciones en la concentración y la temperatura	33
Figura 14. Comparación de los datos de viscosidad experimentales a 25°C con modelos teóricos y los ajustes propuestos por esta investigación	35
Figura 15. Viscosidad cinemática de mezclas de biodiésel-MgO a una concentración constante (65 µmol/L) con variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.....	36
Figura 16. Polidispersión de los diferentes diámetros hidrodinámicos medios (tamaño de cluster) de los polvos de MgO.	38

Figura 17. Densidad de mezclas biodiésel-MgO medida a 15°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.....	39
Figura 18. Densidad de mezclas biodiésel- MgO (49.7nm - 9.3 µm) con variaciones en la concentración y la temperatura.....	39
Figura 19. Comparación de los datos experimentales de densidad a 25°C con el modelo teórico de Pak & Cho.....	40
Figura 20. Densidad de mezclas biodiésel-MgO a 65 µmol/L para diferentes tamaños de cluster.....	41
Figura 21. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MgO a 25°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.....	42
Figura 22. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MgO (49.7 nm - 9.3 µm) a diferentes concentraciones y temperaturas.	42
Figura 23. Comparación de los valores experimentales de índice de refracción con el modelo teórico de Rayleigh.	43
Figura 24. Índice de refracción de mezclas de biodiésel-MgO a 65 µmol/L con variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.....	45
Figura 25. Viscosidad de mezclas de biodiésel-MnO con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.....	46
Figura 26. Viscosidad de mezclas de biodiésel-MnO de 12.7 µm con variaciones en la concentración y la temperatura.	46
Figura 27. Comparación de los datos experimentales de viscosidad de mezclas de biodiésel-MnO a 25°C con modelos teóricos y los ajustes propuestos por esta investigación.	48
Figura 28. Viscosidad cinemática de muestras biodiésel-MnO a 65µmol/L con variaciones en el tamaño de cluster.....	49
Figura 29. Efecto de la polidispersión para el sistema MnO-biodiésel.....	49
Figura 30. Densidad de mezclas biodiésel-MnO a 15°C con variaciones en el tamaño de partícula y la concentración.	50
Figura 31. Densidad de mezclas biodiésel-MnO con tamaño de cluster de 8.7 µm con variaciones en la concentración y la temperatura.	51

Figura 32. Comparación de los datos experimentales de densidad de mezclas biodiésel-MnO a 25°C con el modelo teórico de Pak & Cho.....	51
Figura 33. Densidad de mezclas biodiésel-MnO a 45µmol/L con variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.....	52
Figura 34. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MnO a 25°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.....	53
Figura 35. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MnO de 8.7 µm realizando variaciones en la concentración y la temperatura.....	54
Figura 36. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MnO a 45 µmol/L realizando variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.	54
Figura 37. Comparación de los datos experimentales de índice de refracción a 25°C con el modelo de Rayleigh.....	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de las muestras a utilizar en la investigación	12
Tabla 2. Propiedades y métodos de caracterización	16
Tabla 3. Variaciones en la síntesis por descomposición térmica e hidrotérmica para cambiar el tamaño de partícula.....	21
Tabla 4. Perfil de ésteres metílicos para muestras de biodiésel producido a partir de grasa residual y grasa de res.....	27
Tabla 5. Comparación de propiedades del biodiésel residual con la norma EN14214.....	28
Tabla 6. Tamaños de cristal calculados mediante la ecuación de Scherrer	30

RESUMEN

Brayan Steven Moreno Caballero

Fecha de graduación: Julio de 2020

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título de la investigación: EFECTO DE LOS ÓXIDOS METÁLICOS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES.

Número de páginas: 63

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en
Procesos Sustentables

Propósito y método de estudio: El principal objetivo de este trabajo es determinar el efecto de la concentración y el tamaño de partícula de aditivos de óxidos de magnesio y manganeso sobre las propiedades fisicoquímicas de biodiésel producido a partir de grasas extraídas de lodos de la planta noreste de agua y drenaje de Monterrey.

Contribución y conclusiones: En esta investigación se desarrolló una metodología estandarizada para la producción de biodiésel a partir de grasas residuales obtenidas de la planta noreste de agua y drenaje de Monterrey, las características del biodiésel obtenido cumplen con los parámetros de la norma EN 14214. Se obtuvo un rendimiento de producción de biodiésel de 90% a una relación molar metanol:grasa de 6:1, 0.3%v de H_2SO_4 y 8 hrs de reacción. Se realizaron mezclas biodiésel-MgO y biodiésel-MnO variando la concentración de óxido (35, 45, 55, 65, 85 y 100) $\mu\text{mol/L}$, el tamaño de cluster del MgO (16.1, 12.9, 9.3 y 6.5) μm y del MnO (12.3, 5.9, y 8.7) μm para estudiar los efectos de la variación dichos parámetros sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel. Se observó que para ambos sistemas biodiésel-MgO y biodiésel MnO a concentraciones entre 35 y 65 $\mu\text{mol/L}$ la densidad, la viscosidad y el índice de refracción aumentan conforme se incrementa la concentración, a concentraciones superiores a 65 $\mu\text{mol/L}$ las tres propiedades tienden a disminuir. Se logró una disminución máxima en la viscosidad de 4.8% en la muestra de MgO de 60.7 nm a 100 $\mu\text{mol/L}$. Los valores de densidad e índice de refracción aumentaron para todas las muestras de los dos sistemas, mostrando incrementos máximos de 1.7% y 0.09% respectivamente. Para el caso de la densidad inclusive con el incremento máximo las muestras no superan el valor máximo de 0.90 gr/cm^3 a 15°C establecido por la norma EN 14214. Pa.

Firma del asesor:

Dr. José Julián Cano Gómez.



1. INTRODUCCIÓN

El creciente incremento en la demanda energética global, así como el incremento en los niveles de contaminantes presentes en la atmósfera representan una de las principales problemáticas de la sociedad moderna. Actualmente la principal fuente de energía son los combustibles fósiles, se estima que para el año 2030 la demanda mundial de petróleo incrementará de 85 millones de barriles al día (mdb) a 107 mbd¹, por lo cual las emisiones de gases contaminantes producidos por la quema de combustibles de origen fósil también aumentarán, provocando graves afectaciones al medio ambiente como el calentamiento global, la lluvia ácida, la reducción en la capa de ozono, entre otros. Los contaminantes que se generan a partir de la quema de combustibles fósiles son: CO₂, CO, CH₄, N₂O y clorofluorocarbonos los cuales son conocidos como gases de efecto invernadero (GEI).

Las actividades económicas que más contribuyen a la producción de GEI son: la agricultura, sector industrial, transporte, ganadería y la producción de electricidad. El transporte aporta un 14% del total de las emisiones de GEI; principalmente dióxido de carbono producido por la quema de combustible por parte de vehículos motorizados² Por esta razón es importante buscar la sustitución parcial o total de los combustibles fósiles por biocombustibles que provengan de materias primas renovables y que ayuden a reducir las emisiones.

En la actualidad existen varios biocombustibles alternativos como lo son: biohidrógeno, bioalcoholes, biogás y biodiésel, los cuales pueden provenir de materias primas renovables como productos naturales o residuos industriales, contribuyendo a la reducción de las emisiones de GEI. El biodiésel en particular destaca dentro de todos los biocombustibles por ser una alternativa prometedora para sustituir el Diesel convencional, ya que ambos combustibles tienen un poder calorífico equiparable de hasta 39.76 KJ/Kg³, favoreciendo su uso en motores de combustión interna por compresión, adicionalmente proviene de fuentes renovables, es biodegradable, y reduce las emisiones de GEI hasta un 51%⁴. Sin

embargo, el biodiésel presenta valores mayores de densidad, viscosidad y tensión superficial que el Diesel lo cual limita su aplicación directa en motores de combustión interna.

La densidad es una propiedad de gran importancia, debido a que está directamente relacionada con el volumen de combustible alimentado al motor. Altos valores de densidad producen un aumento en la cantidad de combustible que es inyectado a la cámara de combustión, ocasionando problemas de combustión incompleta y la formación de depósitos en el motor⁵.

Valores altos de viscosidad provocan una baja atomización del combustible en la cámara de combustión, así mismo incrementa la energía necesaria para bombear el combustible dentro del motor lo que puede causar daños en el sistema de bombeo del motor y en los filtros⁵.

La tensión superficial es crucial en la atomización del combustible debido a que determina el grado de dispersión y la formación de gotas, afectando directamente en la eficiencia de combustión. Por lo que disminuciones en la tensión superficial implicarían mejoras en la eficiencia del motor y la emisión de contaminantes al garantizar un consumo completo del combustible⁶.

El biodiésel se obtiene a partir de ácidos grasos provenientes de aceites o grasas de origen vegetal y animal; los cuales son considerados fuentes renovables. Las fuentes de origen vegetal más utilizadas son el aceite de soya, aceite de palma y aceite de coco mientras que las fuentes de origen animal más comunes son grasa de res, pollo, cerdo y pescado. La selección de la fuente de ácidos grasos está directamente ligada con la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria.

Durante la última década ha surgido la preocupación con respecto al uso de recursos alimenticios para la producción de biocombustibles. En octubre de 2011, las Naciones Unidas recomendaron revisar las políticas en materia de biocombustibles y los retos que pueden presentar para la seguridad alimentaria,

de manera que la producción de biocombustibles sea viable desde el punto de vista social, económico y ambiental⁷. Debido de esta problemática surgió la necesidad de buscar fuentes de materias primas para la producción de biodiésel diferentes a los cultivos energéticos. Algunas estas alternativas son los residuos grasos de industrias como los rastros, restaurantes y plantas de tratamiento de agua residual. Las grasas residuales (GR) contenidas en los lodos y espumas provenientes de procesos de tratamiento de aguas representan una alternativa prometedora tanto a nivel ambiental como económico, esto debido a que permite generar un biocombustible a partir de un residuo y también reducir los costos de las plantas tratadoras en materia de disposición de residuos, los cuales se estiman en 200,000 USD al año⁸.

Los lodos y espumas son residuos que se obtienen en las fases primaria y secundaria del tratamiento de aguas residuales (AR). Estos desechos contienen alrededor del 60% de su peso en grasas⁸. Al tener un alto contenido de grasa y no tener un valor comercial, los lodos de agua residual son una fuente de ácidos grasos económica y viable. Por lo que en la presente investigación se propone la producción de biodiésel a partir de grasa residual extraída de los lodos generados en la planta noreste de agua y drenaje de Monterrey.

Los lodos de agua residual además de grasas contienen residuos sólidos, residuos orgánicos, residuos metálicos y agua, los cuales se retiran mediante procesos de filtración y calentamiento. Sin embargo, existen partículas muy pequeñas (alrededor de 2 μm) de componentes orgánicos e inorgánicos que solo se pueden retirar mediante procesos de extracción sólido-líquido, permitiendo la separación total de la fracción de grasa pura contenida en los lodos. Una ventaja adicional de este tipo de método es que permite la recuperación y reutilización de los solventes utilizados⁹.

La producción de biodiésel se logra mediante una reacción de transesterificación en la cual los ácidos grasos reaccionan con un alcohol para formar ésteres metílicos de ácidos grasos. La reacción ocurre en presencia de un catalizador el cual puede ser de dos clases: homogéneo o heterogéneo.

Los catalizadores homogéneos como: hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, carbonatos o alcóxidos, favorecen conversiones superiores al 80% y tienen como ventaja tiempos cortos de reacción, sin embargo, al estar en fase líquida al igual que el biodiésel presentan una difícil separación al final de la reacción¹⁰.

Los catalizadores heterogéneos como: óxidos de metales alcalinotérreos, zeolitas y heteropoliácidos son fácilmente separables mediante procesos sencillos de filtración, debido a que se encuentran en fase sólida. En su gran mayoría pueden ser obtenidos de fuentes renovables como residuos alimenticios, conchas de moluscos o cáscaras de huevo. Adicionalmente pueden ser reutilizados varias veces, a diferencia de los catalizadores homogéneos que son de un solo uso¹⁰.

Existen estándares internacionales como lo son las normas EN 14214 y ASTM 6751 que regulan los valores de las propiedades termodinámicas y de transporte del biodiésel con el objetivo de garantizar su calidad y aplicabilidad, sin embargo, como se mencionó anteriormente, las propiedades fisicoquímicas del biodiésel difieren de las propiedades del Diesel limitando su uso directo en motores de combustión interna por compresión¹¹. A lo largo de los años se ha buscado mejorar las propiedades del biodiésel mediante el uso de aditivos como oxigenantes y óxidos metálicos, estos compuestos permiten lograr mejoras en las propiedades fisicoquímicas como lo son disminuciones en la viscosidad y la capacidad antidetonante del biocombustible al aumentar el flash point¹².

Los aditivos más utilizados hasta el momento son alcoholes de cadena corta como metanol y etanol, sin embargo, estos alcoholes presentan desventajas como un bajo poder calorífico, baja solubilidad en todo el rango de concentraciones, baja lubricidad y bajo número de cetano. Para subsanar estas desventajas se han realizado investigaciones utilizando aditivos de alcoholes de cadena larga como los isómeros de butanol y pentanol⁵. No obstante, este tipo de aditivos tienen un costo mayor a los alcoholes de cadena corta por lo que el

costo de producción de la mezcla biodiésel incrementa y por lo tanto su competitividad económica frente al Diesel disminuye.

El uso de óxidos metálicos como aditivos representa una alternativa frente al uso de alcoholes, debido a que los óxidos se mezclan con el biodiésel en concentraciones de partes por millón, por lo que se requiere muy poca cantidad de material, haciendo que la implementación de estos aditivos no genere un incremento significativo en el costo de producción del biocombustible. Óxidos de magnesio y titanio han sido utilizados como aditivos de Diesel, mostrando mejoras en el rendimiento del motor y disminuciones en las emisiones de CO, CO₂, NO_x y material particulado¹³. De igual manera, la implementación de óxidos de magnesio y manganeso como aditivos de biodiésel puro, permitió obtener una disminución de los valores de viscosidad y punto de congelamiento, así como también incrementos en el flash point y un mayor número de cetano, garantizando un manejo más seguro del combustible y un incremento en el rendimiento del motor respectivamente¹⁴. Sin embargo, en estas investigaciones se analiza el efecto de los óxidos sobre el rendimiento del motor y no sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel directamente.

A nuestro conocimiento aún no existen investigaciones reportadas en la literatura acerca del efecto estructural de los óxidos de magnesio y manganeso sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel cuando son usados como aditivos. La intención del presente proyecto es elucidar el efecto del tamaño de partícula y concentración de los óxidos de magnesio y manganeso como aditivos del biodiésel sobre las propiedades fisicoquímicas de la mezcla.

2. ANTECEDENTES

Actualmente una de las principales limitaciones en la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales es un costo de producción mayor el diésel de origen fósil. Debido esto, materias primas alternativas como los lodos de agua residual han surgido como opciones más económicas y amigables con el medio ambiente.

Jarde et al.¹⁵ analizaron 48 muestras de lodos de agua residual, encontrando que éstos contienen hasta un 54% de ácidos grasos de cadenas largas (entre 10 y 18 carbonos), los cuales son de gran interés para la producción de biodiésel. Mondala et al.¹⁶ produjeron biodiésel a partir de lodos primarios y secundarios de aguas residuales, si bien obtuvieron un rendimiento máximo de 14.5%, los bajos costos de producción del proceso lo hacen económicamente rentable. Por otro lado, Bi et al.¹⁷ desarrollaron un método de calentamiento y filtrado de lodos de agua residual para la extracción de grasa, la cual se utilizó en una reacción de transesterificación con metanol y H_2SO_4 , obteniendo una conversión del 70%.

Los procesos convencionales de producción de biodiésel se llevan a cabo usando catalizadores homogéneos como KOH, NaOH, HCl, entre otros. Varias investigaciones (Jain et al.¹⁸, Reyero et al.¹⁹, Rathore et al.²⁰, Shahbazi et al.²¹, Yunus et al.²², Dorado et al.²³, entre otros), reportan rendimientos superiores al 90% con el uso de estos catalizadores con tiempos de reacción de 60 minutos, sin embargo, presentan algunos problemas como la formación de jabones y la dificultad para separar el catalizador del producto final. Por otra parte, diversos autores (Lu et al.²⁴, Gurunathan et al.²⁵, Nair et al.²⁶ y Kostić et al.²⁷) Han utilizado catalizadores heterogéneos como óxidos de zinc y calcio, los estudios reportaron rendimientos superiores al 90% y una fácil remoción del catalizador al final de la reacción, adicionalmente los catalizadores pueden ser reutilizado varias veces. No obstante, se requirieron tiempos de reacción de hasta 180 minutos.

El óxido de calcio CaO destaca dentro de los catalizadores heterogéneos porque puede ser obtenido de fuentes renovables como cáscaras de huevo y de moluscos. Maneerung et al.²⁸ produjeron biodiésel empleando como catalizador CaO sintetizado a partir de estiércol de pollo. Los autores lograron conversiones

del 90 %, con una concentración del 7.5 % en peso de catalizador. Por otro lado, Niju et al.²⁹ sintetizaron CaO a partir de cáscara de huevo, logrando una conversión a biodiésel del 94%. Ambos investigadores, utilizaron como fuente de producción de biodiésel el aceite de cocina residual.

Como se mencionó anteriormente, biodiésel tiene algunas desventajas respecto al diésel convencional, donde el uso de aditivos representa ser una alternativa para subsanar estas diferencias. Diversas investigaciones se han enfocado en el estudio de nuevos aditivos. Gürü et al.³⁰ evaluaron el efecto de óxidos de manganeso, magnesio, cobre y calcio como aditivos del Diesel puro a una concentración constante de 54.2µmol óxido/L de Diesel. Los autores reportaron disminución en el punto de congelamiento de 12.4°C y un aumento en el número de cetano a 48.24, condiciones que favorecen el comportamiento del combustible a bajas temperaturas y la calidad de la combustión respectivamente.

Keskin et al.¹⁴ implementaron mezclas de biodiésel con óxidos de magnesio y molibdeno obteniendo incrementos en el flash point y disminución de la viscosidad, así mismo disminución en las emisiones de NO_x y CO₂. Özgür et al.³¹ Realizaron mezclas de biodiésel con óxidos de magnesio y silicio a concentraciones de 20 y 50 ppm obteniendo como resultado reducciones en la viscosidad y las emisiones de NO_x y CO₂, también reportaron un incremento en el flash point.

Çaynak et al.³² realizaron mezclas de aditivo metálico de óxido de manganeso a una concentración de 12 µmol/L con biodiésel obtenido de aceite de orujo de oliva. Los autores reportaron disminuciones en la viscosidad y el punto de congelamiento, así mismo obtuvieron incrementos en el número de cetano. Dentro de los óxidos metálicos que se usan como aditivos los que mejor presentan disminuciones en las emisiones de gases contaminantes son los óxidos de magnesio y manganeso³³.

Los fluidos que contienen partículas sólidas en suspensión se denominan nanofluidos y abarcan una gran variedad de aplicaciones, las investigaciones con nanofluidos están dirigidas a evaluar el cambio de sus propiedades fisicoquímicas, principalmente conductividad térmica, densidad y viscosidad con respecto al tamaño, concentración y morfología de las partículas en suspensión. Existen diversos estudios como los de Pastoriza-Gallego et al.³⁴, Namburu et al.³⁵, He et al.³⁶ entre otros en donde se logran incrementos en la conductividad térmica y disminuciones en la viscosidad de fluidos como agua y etilenglicol con la adición de nanopartículas metálicas.

Las investigaciones acerca de la producción de biodiésel como combustible alternativo ha sido fuente de estudio durante los últimos años. Los principales aspectos que se han estudiado son las materias primas, los tipos de catalizadores y los costos de producción. Procesos de producción que involucren materia prima residual y el uso de catalizadores sintetizados a partir de residuos agroindustriales, representa ser una alternativa sustentable y económica en el proceso de producción de biodiésel. Además, el estudio del efecto del tamaño de partícula de los óxidos metálicos como aditivos del biodiésel no ha sido reportado en literatura. Por lo anterior, el estudio del efecto del tamaño de partícula y de concentración de estos aditivos, sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido a partir de lodos y espumas residuales, representa una contribución al desarrollo tecnológico y científico en el área de los biocombustibles.

Los estudios sobre el uso de óxidos metálicos para mejorar las propiedades del biodiesel se enfocan principalmente en la disminución de emisiones (CO, CO₂, NO_x y material particulado) y la mejora del rendimiento del motor (potencia, consumo de combustible y eficiencia térmica). Sin embargo, el cambio en las propiedades fisicoquímicas no ha sido ampliamente investigado.

3. APORTACIÓN CIENTÍFICA

Los aportes científicos del proyecto son:

- Uso de los lodos y espumas residuales generados durante el tratamiento de aguas residuales del área metropolitana de Monterrey como materias primas para la producción de biodiésel.
- Entendimiento del efecto del tamaño de partícula y de concentración de los aditivos MnO_2 , MgO y $\text{MnO}_2\text{-MgO}$ sobre las propiedades fisicoquímicas de biodiésel producido a partir de grasas residuales.

4. HIPÓTESIS

El uso de MnO_2 , MgO y $\text{MnO}_2\text{-MgO}$ como aditivos mejorarán las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido a partir de grasas residuales extraídas de la espuma y los lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el efecto de los aditivos, MnO_2 y MgO , sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido a partir los lodos y espumas residuales

5.2. Específicos

- Producción de biodiésel a partir de grasas residuales, que cumpla con los estándares de calidad establecidos por la norma EN 14214.
- Sintetizar y caracterizar los aditivos de MnO_2 y MgO realizando variaciones en el tamaño de partícula.
- Determinar experimentalmente las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de biodiésel + aditivos, como: densidad, viscosidad e índice de refracción.

METODOLOGÍA.

La metodología de la presente investigación para lograr los objetivos propuestos se desarrolló en 4 etapas (Figura 1), las etapas se describen detalladamente en la sección de desarrollo experimental.

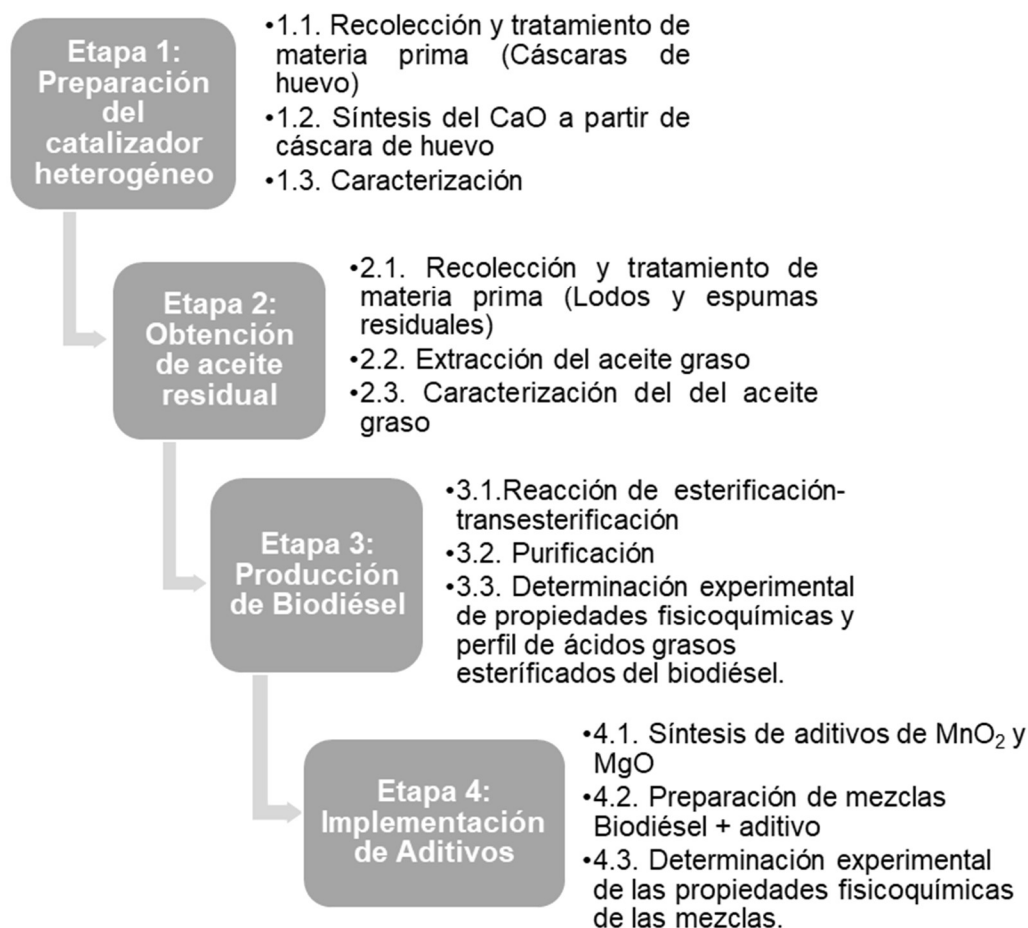


Figura 1. Diagrama de etapas de la investigación

5.1. Materiales y equipo de laboratorio

Lodos residuales para la producción de biodiésel serán suministrados por la planta noreste de agua y drenaje de Monterrey, mientras que el CaO utilizado

como catalizador en la reacción de transesterificación será producido a partir de cáscaras de huevo. Tabla 1 se muestra las especificaciones de los reactivos utilizados en la producción de biodiésel y síntesis de los óxidos de magnesio y manganeso.

Tabla 1. Especificaciones de las muestras a utilizar en la investigación

Nombre Químico	Marca	No. CAS	Pureza Inicial Fracción masa
Metanol	Merck	67-56-1	0.999
Hidróxido de Sodio	Sigma-Aldrich	1310-73-2	0.97
Hidróxido de Potasio	Sigma-Aldrich	1310-58-3	0.97
Hexano	Sigma-Aldrich		
Nitrato de magnesio hexahidratado	Sigma-Aldrich	13446-18-9	0.98
Sulfato de manganeso monohidratado	Sigma-Aldrich	10034-96-5	0.99
Permanganato de potasio	Sigma-Aldrich	7722-64-7	0.99

5.2. Desarrollo Experimental

En esta sección se detallan cada una de las etapas planteadas para la ejecución de la investigación.

5.2.1. Etapa 1: Preparación del catalizador heterogéneo (CaO) para la reacción de transesterificación.

Para esta etapa se recolectaron las cáscaras de huevo de diferentes integrantes de la comunidad universitaria. Las cáscaras se deben lavar con agua y jabón para retirar cualquier impureza que puedan contener, seguidamente se le retira la membrana interna y se secan por 24 horas a una temperatura de 105°C. Posteriormente, las cáscaras se trituran hasta obtener un polvo fino, el cual es calcinado a 900°C por 5 horas. La Figura 2 muestra un diagrama de todo el proceso.

El producto obtenido de la calcinación se analizó mediante un análisis de difracción de rayos X para comprobar que sus fases cristalinas correspondan a las del óxido de calcio.

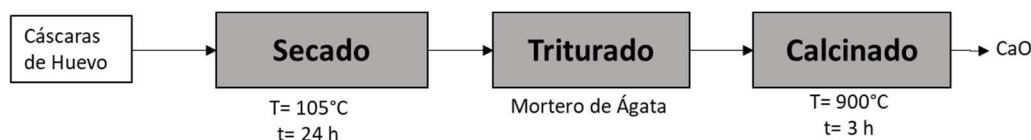


Figura 2. Diagrama de flujo de la etapa 1

5.2.2. Etapa 2: Extracción de aceite graso

Los lodos y espumas de agua residual fueron colectados en la salida de desechos del desarenador de la planta noreste de agua y drenaje de monterrey, estos lodos se almacenaron en recipientes de vidrio de boca ancha y se mantuvieron en refrigeración hasta su uso. Se les realizó una determinación de grasas y aceites recuperables siguiendo el procedimiento establecido en la NMX-AA-005-SCFI-2000.

Los lodos son sometidos a un proceso de filtrado a 70°C para separar los residuos sólidos y arenas gruesas contenidos. Una vez separado todo el material sólido, los lodos se llevaron a un proceso denominado baño ácido, en el cual fueron mezclados en una relación volumétrica 1:1 con una solución acuosa al

6%v de ácido sulfúrico durante 1 hora. Este proceso permitió separar la grasa de jabones, material orgánico y trazas de elemento metálicos.

Las grasas obtenidas fueron sometidas a un proceso de purificación empleando un equipo de extracción soxhlet utilizando hexano como solvente. El proceso tuvo una duración de 6 horas. Posteriormente, la grasa extraída con rastros de hexano fue sometida a condiciones de vacío a presiones entre 330 y 100 mbar para eliminar el hexano residual y éste pueda ser reutilizado. La Figura 3 muestra un diagrama de todo el proceso

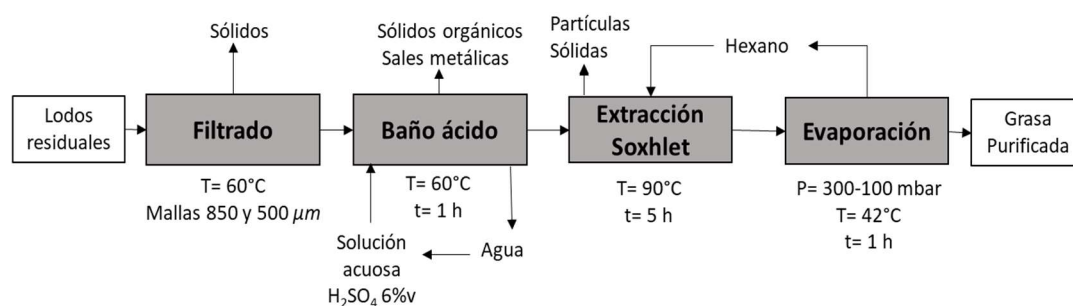


Figura 3. Diagrama de flujo de la etapa 2

5.2.3. Etapa 3: Producción y caracterización de biodiésel

La producción de biodiésel consiste en dos etapas de proceso, esterificación y transesterificación, la cuales consisten en la conversión de ácidos grasos libres y triglicéridos en ácidos grasos esterificados, respectivamente.

La reacción de esterificación se realizó en un sistema tipo "batch" el cual consiste en un matraz de tres bocas acoplado a un condensador con el fin de evitar la evaporación del metanol. Para evaluar el rendimiento de la esterificación se utilizaron relaciones molares grasa:metanol de 3:1, 6:1 y 9:1 en presencia de ácido sulfúrico como catalizador (3, 6 y 9%v con respecto a la grasa) con tiempos de reacción de 6 y 8 horas a una temperatura de 60°C . Al finalizar se obtienen dos productos de reacción que se separan en dos fases: la fase superior es mezcla de biodiesel y triglicéridos (biodiésel crudo), mientras que la parte inferior es glicerol. El biodiésel crudo se separa del glicerol y seguidamente se lleva a transesterificar.

La transesterificación se llevó a cabo en un sistema "batch", utilizando óxido de calcio como catalizador (0.1%p en base al biodiésel crudo) con una relación molar grasa:metanol de 6:1. Las condiciones de reacción fueron 60°C por una 1 hora. Al finalizar la reacción, biodiésel y glicerol, son separados por decantación. Posteriormente, biodiésel es sometido a un proceso de lavado empleando agua destilada para retirar trazas de metanol, glicerol y catalizador que pueda contener. El proceso consiste en mezclar biodiésel con agua (3:1 biodiésel/agua) en un embudo de decantación con agitación vigorosa hasta formar una sola fase, luego de 8 horas las fases se separarán. Este proceso se repitió hasta que el pH del agua de lavado es igual al pH del agua destilada. Finalmente, el biodiésel lavado se filtró usando papel filtro de 2 μm y se calentó a 110°C para retirar el exceso de agua y metanol. La Figura 4 muestra un diagrama de todo el proceso.

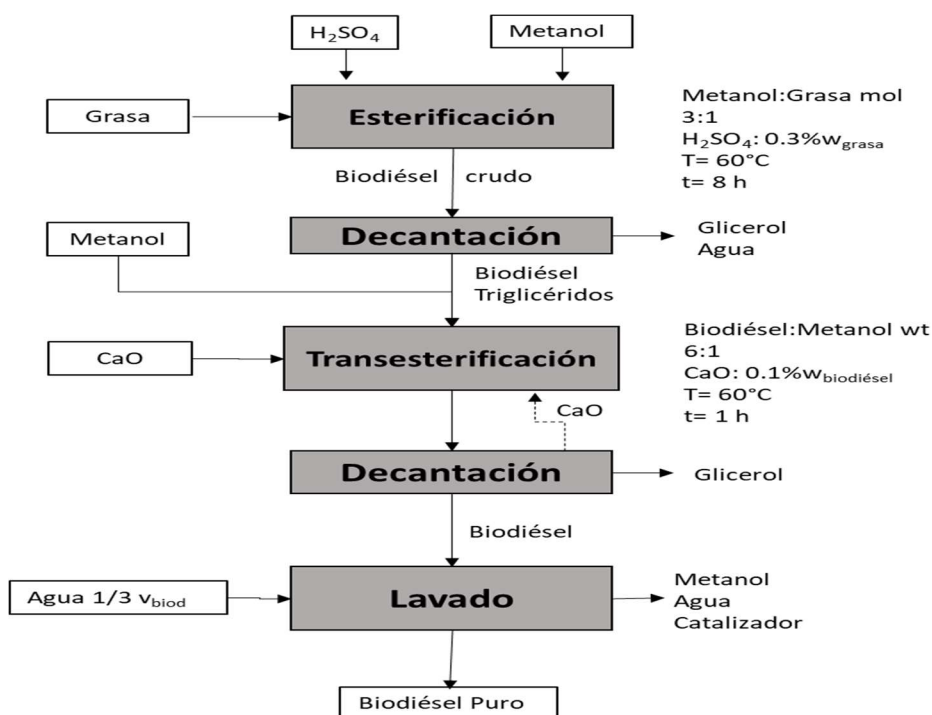


Figura 4. Diagrama de flujo de la etapa 3

La caracterización del biodiésel se llevó a cabo acorde a la norma EN 14214, donde se especifican los métodos de análisis y los valores límites establecidos para el biodiésel (Tabla 2).

Tabla 2. Propiedades y métodos de caracterización

Propiedad	Método analítico	Límites
Viscosidad cinemática, 313.15 K [mm ² /s]	EN ISO 3104	3.5-5.0
Flash point [K]	EN ISO 3679	>393.15
Freezing point [°C]	ASTM D2500	n/a
Número de cetano	ASTM D613	Min 47
Índice de acidez [mg KOH/g]	EN 14104	Máx. 0.5
Índice de yodo[%w]	EN 14111	Máx. 120
Contenido de metanol[%w]	EN 14110	Máx. 0.2
Densidad 28.15K [g/cm ³]	ISO 12185	0.86-0.90
Contenido de agua [mg/kg]	ISO 12937	Máx. 500

La viscosidad cinemática se determinó empleando un viscosímetro de capilar Cannon-Fenske número 75, con un rango de medición de $(1.6-8) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, la precisión reportada por el fabricante es de $\pm 0.2\%$. La temperatura circundante al viscosímetro se controló mediante su inmersión en un tanque de agua acoplado a un baño recirculante. La temperatura dentro del tanque se midió usando un termómetro Pt-100 con una incertidumbre estándar de 0.03 K. Para la medición de la viscosidad se cronometró el tiempo que tarda en descender cierto volumen de muestra a través del capilar previamente calibrado del viscosímetro, para medir el tiempo se utilizó un cronómetro digital con una precisión de 0.01 s. El cálculo de la viscosidad cinemática se realizó utilizando la siguiente expresión.

$$v = K(T) * t \quad (1)$$

Donde t es el tiempo de descenso del fluido en segundos y $K(T)$ es la constante de calibración del viscosímetro en $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Cada medición de viscosidad cinemática es el promedio de tres corridas. La incertidumbre estándar en la viscosidad es de 0.01⁵.

Las mediciones de densidad se realizaron empleando un densímetro de tubo vibrante Anton Paar DMA 500. La reproducibilidad reportada por el fabricante para la densidad y la temperatura son $1 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ y 0.001 K, respectivamente. La densidad del fluido se relaciona con el periodo de oscilación de un tubo en forma de U dentro del cual se encuentra el fluido a analizar, para la medición el tubo es sometido a una fuerza electromagnética armónica y el periodo del tubo es medido con un osciloscopio. El densímetro se calibra periódicamente utilizando agua ultra pura y aire como fluidos de referencia. La incertidumbre estándar de la densidad es 3×10^{-4} ⁵.

Para medir el índice de refracción, se utilizó un refractómetro Abbemat 300 en el cual, la muestra situada sobre un prisma de medición es irradiada por un LED desde diferentes ángulos. En la interfaz entre la muestra y el prisma, el haz incidente se refracta en la muestra o bien se refleja en el prisma. El haz reflejado es detectado por una red de sensores. Luego se calcula el ángulo crítico de reflexión total y, a partir de este valor, se determina el índice de refracción (IR) de la muestra. La precisión reportada por el fabricante es $\pm 0,0001$.

La tensión superficial se midió en un Tensiómetro de anillo (701 KSV, Sigma). El equipo tiene una resolución para la masa y el ángulo de contacto de 0.005 mg y 0.01°, respectivamente. El principio de operación del equipo consiste en registrar y analizar las fuerzas ejercidas sobre una muestra sólida o líquida usando una microbalanza sensible. La fuerza registrada por la balanza es convertida directamente en tensión superficial o tensión interfacial cuando se utiliza un anillo de platino Du Noüy o un plato Wilhelmy.

El flash point se determinó mediante un medidor Pensky-Martens de copa cerrada (K16203, Koehler), la medición consiste en poner la mezcla dentro de la copa del medidor donde es agitada constantemente mientras se incrementa la temperatura gradualmente a una tasa entre los 5 y 6°C/min, un termómetro Pt-100 con una incertidumbre estándar de 0.03 K se encuentra acoplado a la copa para medir la temperatura de la mezcla. La agitación se detiene cada que la temperatura de la mezcla incrementa 2°C para introducir una fuente de ignición

dentro de la copa hasta que se produzca una llama, la temperatura que muestra el termómetro en el momento de la aparición de la flama es el flash point.

Para el biodiésel puro el número de cetano se estimó mediante dos correlaciones empíricas: Bamgboye et al.³⁷ (Ecuación 1) y Gopinath et al.³⁸ (Ecuación 2) a partir del perfil de ésteres metílicos.

$$CN = 61.1 + 0.088x_2 + 0.133x_3 + 0.152x_4 - 0.101x_5 - 0.039x_6 - 0.243x_7 - 0.395x_8 \quad (1)$$

Donde los coeficientes x_2 a x_8 son los porcentajes en peso de los siguientes ésteres metílicos: miristato, palmitato, palmitoleato, estearato, oleato, linoleato y linolenato respectivamente. Ecuación de Gopinath et al.³⁸ se expresa como:

$$CN = 62.2 + 0.017L + 0.074M + 0.115P - 0.177S - 0.103O - 0.279LI - 0.366LL \quad (2)$$

Donde L, M, P, S, O, LI y LL son los porcentajes en peso de Laurato, miristato, palmitato, estearato, oleato, linoleato y linolenato respectivamente.

El número de cetano de las mezclas se midió utilizando un analizador portable de octano/cetano (K88600, Koehler), el cual determina el índice de cetano mediante espectroscopía de infrarrojo cercano, usando 14 longitudes de onda que cubren el rango de 893 nm a 1045 nm. El equipo analiza el espectro de la muestra y su variación con respecto a un estándar de calibración. La cuantificación se obtiene utilizando modelos matemáticos basados en regresión lineal múltiple y regresión de mínimos cuadrados que correlacionan el índice de cetano con el espectro de infrarrojo cercano, estos modelos se encuentran precargados en el equipo.

Para medir el punto de congelamiento se colocan 25 ml de mezcla y un termómetro dentro un tubo de cristal de fondo plano, seguidamente el tubo se coloca en un baño de enfriamiento el cual se encuentra a una temperatura entre los 0 y -18°C. La mezcla se retira y se devuelve rápidamente al baño cada vez

que la temperatura disminuye 1°C para observar si existe formación de cristales en el fondo del tubo, una vez aparecen los cristales la temperatura que indica el termómetro representa el punto de congelamiento de la mezcla.

Para determinar el perfil de ésteres metílicos del biodiésel se utilizó un cromatógrafo de gases (5890^a, HP) acoplado a un detector de ionización de flama. La separación de los componentes es realizada con una columna de sílice fundida (530, Omegawax) de 30 metros de longitud, 0.53 mm de diámetro interno y 0.5 µm de espesor. La temperatura del inyector y del detector se mantuvieron a 250 °C. La temperatura del horno se mantuvo a 40 °C por 2 min y fue incrementando hasta 240 °C a una velocidad de 7 °C/min, sostenido por 18 min.

5.2.4. Etapa 4: Implementación de aditivos en biodiésel

Los aditivos utilizados fueron óxido de magnesio y óxido de manganeso, los cuales se sintetizaron por dos métodos: hidrotérmico y descomposición térmica

La síntesis por descomposición térmica del óxido de magnesio consistió en la calcinación de nitrato de magnesio hexahidratado $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a temperaturas entre los 500 y 700°C, una rampa de calentamiento de 5°C/min y un tiempo de 12 horas.

Para la síntesis hidrotérmica del óxido de magnesio se utilizó como precursor nitrato de magnesio hexahidratado $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y como solvente una solución acuosa e hidróxido de sodio NaOH. La reacción se llevó a cabo en una autoclave de teflón durante 2 horas a 180°C. Como producto de ésta reacción se obtuvo $\text{Mg}(\text{OH})_2$, el cual fue filtrado, y secado en un horno a 110°C durante 12 horas. Seguidamente fue calcinado empleando tres rampas de calentamiento: (1) 280°C durante 1 hora, (2) 350°C durante 2 horas y (3) 450°C durante 2 horas. Al final del proceso se obtuvo un polvo blanco. Para comprobar las fases cristalinas características del MgO el polvo se analizó por difracción de rayos X y para estimar el tamaño de partícula se utilizó microscopía electrónica de barrido SEM.

La síntesis por descomposición térmica del óxido de manganeso consistió en la calcinación de sulfato de manganeso hexahidratado a temperaturas entre los 850 y 1050°C, una rampa de calentamiento de 5°C/min y un tiempo de 12 horas.

El óxido de manganeso se sintetizó utilizando como precursor sulfato de manganeso hexahidratado y como solvente una solución acuosa de permanganato de potasio. La reacción se llevó a cabo dentro de una autoclave de teflón durante 3 horas a una temperatura de 140°C, al finalizar la reacción se dejó enfriar el autoclave y se filtró el polvo obtenido, posteriormente se realizó un secado en horno por 12 horas a 110°C. El producto obtenido fue un polvo negro el cual fue sometido a las mismas pruebas que los polvos de MgO.

Las modificaciones realizadas en cada síntesis para obtener cambios en el tamaño de partícula se muestran en la Tabla 3.

Los nanopulvos de óxido de magnesio y manganeso se añadieron directamente en el biodiésel en concentraciones de 35 µmol/l, 45 µmol/l, 55 µmol/l, 65 µmol/l, 85 µmol/l y 100 µmol/l. Para asegurar una solución homogénea cada una de las mezclas colocó dentro de un baño ultrasónico durante 30 minutos. Las mezclas de biodiésel con óxidos metálicos fueron sometidas a los siguientes análisis: densidad (ISO 12185), viscosidad (ISO 3104), tensión superficial, punto de inflamabilidad (ISO 3679), punto de congelamiento (ASTM D2500) y número de cetano (ASTM D613). La Figura 5 muestra el diagrama de flujo para la etapa 4

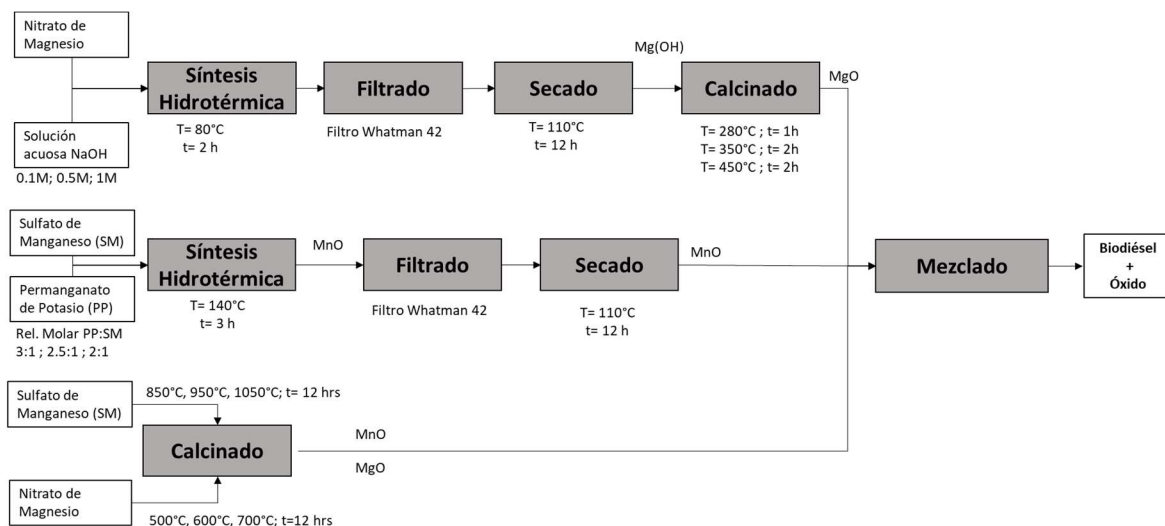


Figura 5. Diagrama de flujo de la etapa 4

Tabla 3. Variaciones en la síntesis por descomposición térmica e hidrotérmica para cambiar el tamaño de partícula.

Óxido	Síntesis	Modificación	Valores
Magnesio	Hidrotérmica	Molaridad del solvente	0.1 M
		(solución acuosa de hidróxido de sodio)	0.5 M
			1.0 M
	Descomposición térmica	Temperatura de calcinación	500°C 600°C 700°C
Manganeso	Hidrotérmica	Relación molar	2:1
		Permanganato de Potasio: Sulfato de Manganeso	2.5:1 3:1
	Descomposición Térmica	Temperatura de calcinación	850°C 950°C 1050°C

6. RESULTADOS

6.1. Etapa 1. Preparación del catalizador heterogéneo (CaO) para la reacción de transesterificación.

Se realizó un análisis de difracción de rayos X a una muestra de cáscara de huevo calcinada a 900° durante 2.5 horas con el fin de observar las fases cristalinas que presenta el material y de esta manera confirmar si en efecto el polvo obtenido se trata de óxido de calcio. El difractograma de rayos X (Figura 6) muestra 5 picos para los valores de 2θ de 32.48, 37.67, 54.12, 64.45 y 67.63 los cuales corresponden a los ángulos de difracción característicos del óxido de calcio (JCPDS no. 48-1467).³⁹⁻⁴² El difractograma no presenta picos adicionales que indiquen la presencia de carbonato de calcio, por lo que se puede asumir que el producto de la calcinación es óxido de calcio.

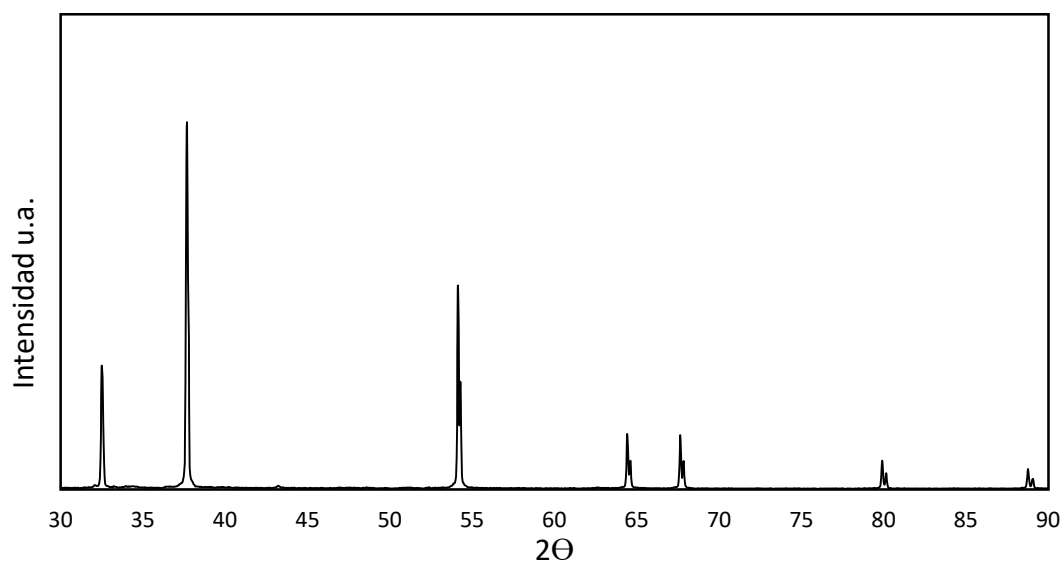


Figura 6. Difractograma de rayos X de muestra de CaO obtenido a partir de cáscara de huevo.

6.2. Etapa 2. Obtención del aceite residual a partir de lodos residuales de la planta noreste de agua y drenaje de Monterrey

Los lodos recolectados del desarenador 1 de la planta noreste de agua y drenaje de Monterrey están compuestos de grasa residual, material sólido, materia orgánica y metales, se realizó un proceso de separación para obtener la grasa residual pura consta de 3 etapas: filtrado, baño ácido y extracción soxhlet.

El filtrado en tamices permitió separar el material sólido de tamaños de 850 y 500 μm . Seguidamente la materia orgánica y las trazas metálicas se separaron con el baño ácido. La Figura 7 muestra el resultado final del baño ácido en donde se aprecia la separación de los componentes.

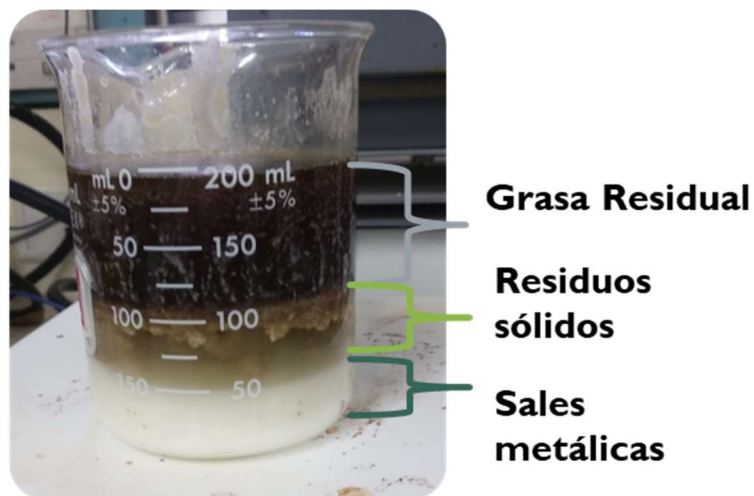


Figura 7. Separación de fases al final del proceso de baño ácido

La grasa residual producto del baño ácido contiene material sólido particulado (tamaños menores a 500 μm) que no fue separado en las etapas anteriores, por lo cual se realizó una extracción soxhlet que permitió obtener una grasa residual libre de impurezas. La Figura 8 muestra las diferentes etapas de purificación de la grasa residual apreciándose un cambio de color.

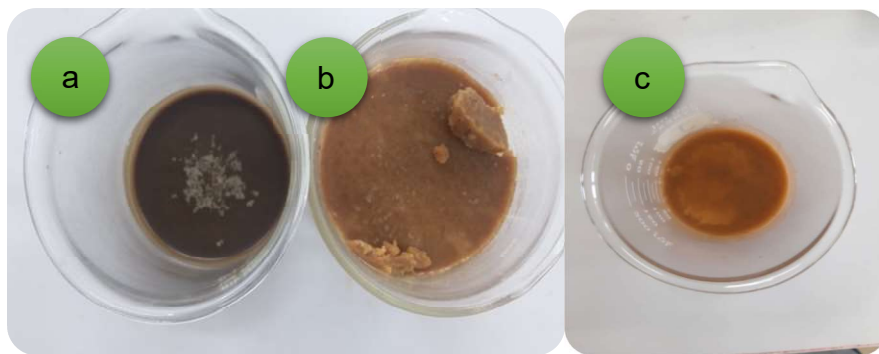


Figura 8. Cambio de aspecto de la grasa durante el proceso de extracción (a: Grasa después del filtrado; b: Grasa después del baño ácido; c: Grasa después de la extracción soxhlet)

Se obtuvo un rendimiento del 40%v en el proceso de purificación de la grasa. Una determinación de grasas y aceites aprovechables mediante el procedimiento de la norma NMX-AA-005-SCFI-2000 evidenció que los lodos residuales contienen un porcentaje de grasas de 44.5%w, por lo que se consideran una fuente abundante de materia prima para la producción de biodiésel.

6.3. Etapa 3. Producción y caracterización de biodiésel.

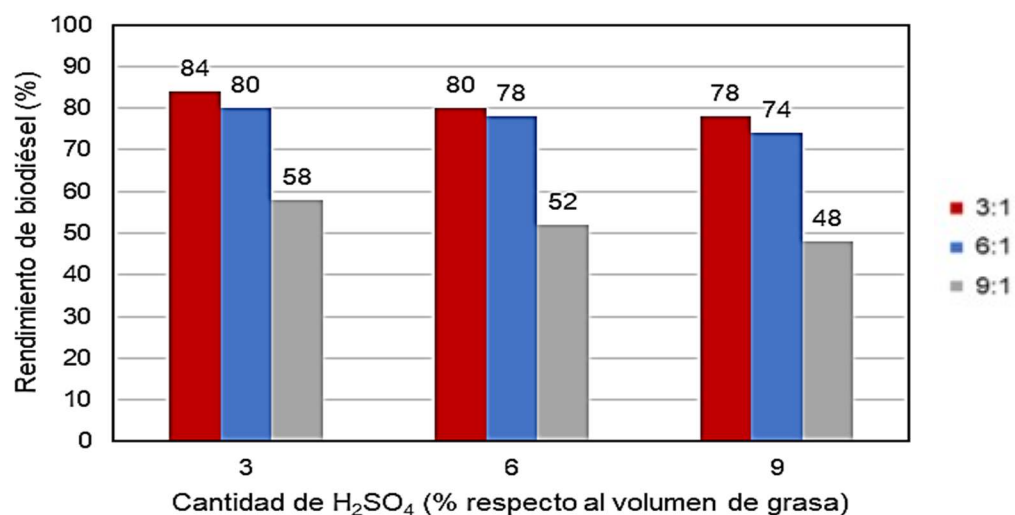
6.3.1. Producción de biodiésel

Existen dos etapas críticas en la producción de biodiésel: la esterificación y la transesterificación. Para ambas etapas el rendimiento es influenciado por tres parámetros principales a los cuales se le realizaron las siguientes variaciones: relación molar metanol:grasa (3:1, 6:1 y 9:1), cantidad de catalizador (3, 6 y 9%v H_2SO_4) y tiempo de reacción (6 y 8 h).

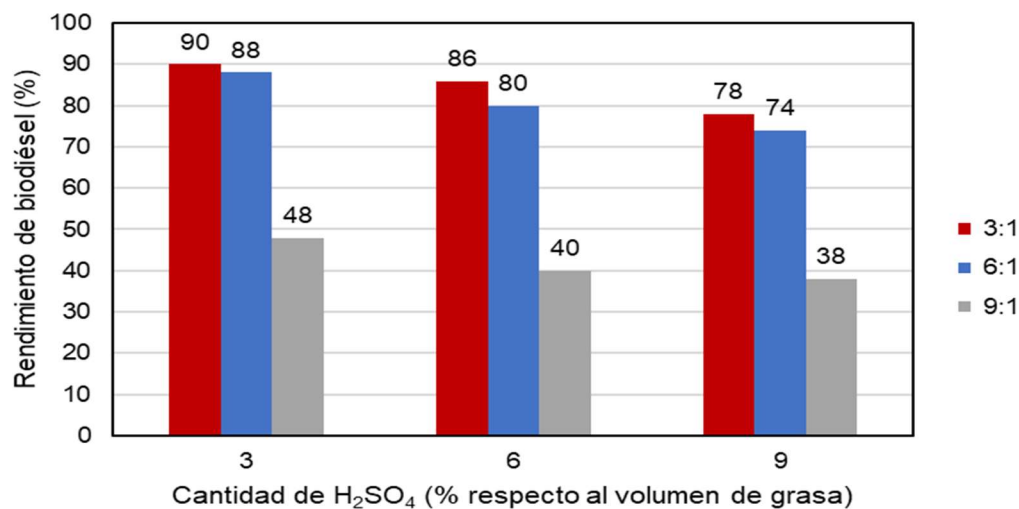
La Figura 9 muestra los efectos de los parámetros anteriormente nombrados sobre el rendimiento de la esterificación.

Un tiempo de 8 horas mostró mayores rendimientos en la producción de biodiésel para las relaciones molares 3:1 y 6:1 sin embargo, para la relación 9:1 el rendimiento disminuyó.

El incremento del %v de H_2SO_4 produjo reducciones en el rendimiento, esto debido a que los excesos de catalizador promueven la formación de jabones en la reacción, reduciendo la conversión de ácidos grasos libres a biodiésel.



(a). Tiempo de reacción 6 horas



(b). Tiempo de reacción 8 horas

Figura 9. Rendimiento de la esterificación a diferentes condiciones de tiempo, relación molar metanol:grasa y cantidad de catalizador.

La relación molar de 3:1 presentó los mayores rendimientos, esto debido a que cuando se tienen relaciones molares metanol:grasa bajas aumenta la velocidad de reacción, caso contrario, a medida que se incrementa la cantidad de metanol la velocidad de reacción disminuye debido a los efectos de disolución que ocurren entre los componentes homogéneos de la mezcla de reactivos y catalizador.

La transesterificación no aportó un incremento significativo en el rendimiento de producción de biodiesel (máximo de 3%), sin embargo, representa una parte importante del proceso ya que transforma los triglicéridos que no fueron convertidos en la esterificación en ésteres metílicos de ácidos grasos, evitando la sedimentación de lípidos en el producto final. El uso del óxido de calcio como catalizador heterogéneo permitió una fácil separación del biodiésel al final de la reacción.

6.3.2. Caracterización del biodiésel

La composición del biodiésel producido (Tabla 4) se obtuvo mediante cromatografía de gases acoplado a un detector de ionización de flama por el método AOAC 969.33. El perfil de ácidos grasos esterificados (PAGE) del biodiésel obtenido de grasa residual se comparó con la composición de biodiésel obtenido a partir de grasa de res con la finalidad de verificar la similitud de los ésteres metílicos contenidos. El PAGE del biodiésel producido a partir de grasa residual mostró una composición similar al biodiésel producido a partir de grasa de res, siendo oleato, palmitato y linoleato los ésteres metílicos predominantes.

Tabla 4. Perfil de ésteres metílicos para muestras de biodiésel producido a partir de grasa residual y grasa de res

Éster de ácido graso	Biodiésel Residual	Biodiésel Res
C9:0 Caprilato	0.12	0
C13:0 laurato	0.25	0
C15:0 Miristato	3.05	2.86
C15:1 Miristoleato	0.55	0.52
C16:0 Pentadecanoato	0.41	0.39
C16:1 Pentadecenoato	0.12	0.11
C17:0 Palmitato	30.24	24.72
C17:1 Palmitoleato	2.65	3.09
C18:0 Margarato	0.84	1.03
C18:1 Margaroleato	0.64	0.76
C18:0 Estearato	1.55	1.89
C20:1 Oleato	55.56	58.48
C19:2 Linoleato	0.68	4.92
C19:3 Linolenato	0.42	0.14
C21:0 Arquidato	0.16	0.11
C21:1 Gadoleato	0.71	0.58
C23:2 Eicosadienato	0.22	0.15
C23:1 Eruciato	0.12	0.25
C23:0 Docosadienoato	1.71	0

Se midieron las propiedades de índice de refracción, densidad, viscosidad, poder calorífico y número de cetano para el biodiésel producido. La tabla 5 muestra una comparación de los valores obtenidos con los límites establecidos en la norma EN 14214 evidenciando que el biodiésel obtenido cumple con el estándar internacional.

Tabla 5. Comparación de propiedades del biodiésel residual con la norma EN14214

Propiedad Del Combustible	EN 14214	Biodiésel Residual
Índice de refracción	-	1.4461
Viscosidad cinemática a 40°C (cSt)	3.5-5.0	4.9482
Densidad a 15°C (g/cm ³)	0.86-0.90	0.8764
Poder calorífico (MJ/Kg)	Min 35	39.71
Flash Point °C	Min 120	-
Número de cetano	Min 47	63 ³⁷ 64 ³⁸

6.4. Etapa 4. Implementación de aditivos

6.4.1. Síntesis de aditivos.

Los óxidos metálicos sintetizados (MnO₂, MgO) fueron caracterizados mediante dispersión de luz dinámica (DLS) para determinar el diámetro hidrodinámico (tamaño de cluster), el cual consiste en una aproximación del tamaño de los aglomerados de partículas de óxido (clusters) al diámetro de una esfera rígida hipotética (Anexo A) y difracción de rayos X para identificar las fases cristalinas de los óxidos producidos y estimar el tamaño de cristal mediante la ecuación de Scherrer expresada como:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

D=tamaño de cristal

K=Constante de forma 0.94

λ = Longitud de onda 0.15406

β = Altura media del pico más alto en radianes

θ = Angulo del pico más alto en radianes

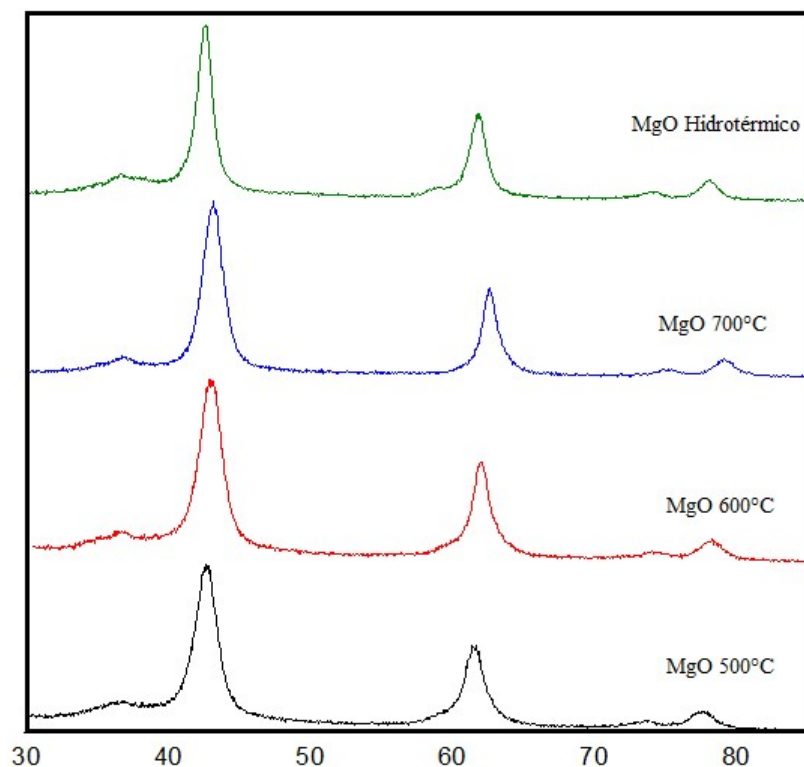


Figura 10. Difractograma de rayos X para 4 muestras de óxido de magnesio obtenidas por método térmico a 500, 600 y 700° y por método hidrotérmico a una concentración de solvente de 0.1 M

Los difractogramas de la Figura 10 pertenecen a 4 muestras de óxido de magnesio, tres de ellas obtenidas por método térmico y una por método hidrotérmico. Las cuatro muestras presentan picos de difracción en valores de 2θ de: 36.97, 42.96, 62.37, 74.77 y 78.72, los cuales corresponden a los picos de difracción característicos de la fase periclase del MgO (JCPDS 4-829). La Tabla 6 muestra los tamaños de cristal calculados mediante la ecuación 3. La síntesis hidrotérmica mostró un incremento del tamaño de cristal conforme al incremento de la molaridad del solvente, mientras que en la síntesis por descomposición térmica el tamaño de cristal más pequeño de 42.2 nm fue obtenido a 600°C y el mayor 60.7 nm a 700°C. La síntesis por descomposición térmica evidenció ser un método apropiado para obtener muestras con tamaños de cristal mayores a los 40 nm.

Tabla 6. Tamaños de partícula y tamaños de cristal de las muestras de óxido de magnesio y manganeso

Óxido	Síntesis	Modificación	Valores	Tamaño de cristal (nm)	Tamaño de cluster (µm)
MgO	Hidrotérmica	Molaridad del solvente (solución acuosa de hidróxido de sodio)	0.1	5	16.1
MnO	Descomposición térmica	Temperatura de calcinación	500°C	49.7	9.3
			600°C	42.2	12.9
			700°C	60.7	6.5
			850°C	85.3	12.7
			950°C	84.4	5.9
			1050°C	94.4	8.7

En las muestras de óxido de magnesio el tamaño de cluster incrementa a medida que disminuye el tamaño de cristal, la muestra con el mayor tamaño cluster (16.1 µm) posee el menor tamaño de partícula debido a que tiene el menor tamaño de cristal (5 nm) y fue sintetizada por método hidrotérmico, el cual permite obtener tamaños de partícula menores que los obtenidos por descomposición térmica, esto indica que la aglomeración de las partículas de óxido aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula.

Para el óxido de manganeso no se encontró una relación directa entre el tamaño de cristal y el tamaño de cluster, esto puede deberse a que el óxido de manganeso presenta una transición de la fase cúbica Mn_2O_3 a la fase tetragonal Mn_3O_4 cuando es calcinado entre los 850 y 950 °C (Figura 11), a diferencia de

los óxidos de magnesio que presentan una sola fase para todas las temperaturas de calcinación trabajadas.

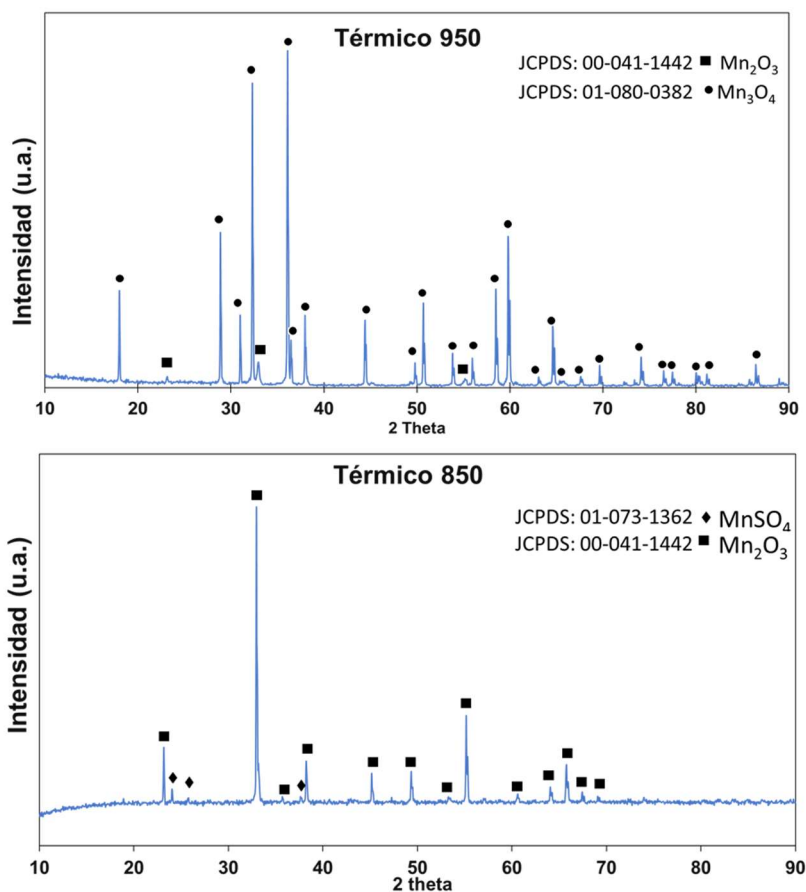


Figura 11. Transición de fase cristalina del óxido de manganeso entre temperaturas de 850°C y 950°C

6.4.2. Determinación experimental de propiedades fisicoquímicas a mezclas de biodiésel-óxido de magnesio.

Las mezclas de biodiésel-MgO fueron preparadas utilizando polvos de MgO con 4 diferentes tamaños de cristal (5, 42.2, 49.7 y 60.7 nm) y de cluster (6.5, 9.3, 12.9 y 16.1 μm) en concentraciones de 35, 45, 55, 65, 85 y 100 $\mu\text{molMgO/Lbiodiésel}$. Se realizaron mediciones experimentales de viscosidad, densidad e índice de refracción para cada una de las mezclas (Anexos B, C y D). Las tres propiedades fueron medidas de 288.15 a 338.15K a presión atmosférica. A continuación, se presentan los resultados y el respectivo análisis de cada propiedad medida.

6.4.2.1. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática disminuye conforme aumenta la temperatura (Figura 13) para todas las mezclas de biodiésel + óxido de magnesio debido a un incremento en la energía cinética del sistema, favoreciendo una disminución de las fuerzas de cohesión y desagrupamiento entre las moléculas.

Para tamaños de cluster de $16.1\ \mu\text{m}$ (tamaños de cristal de $5\ \text{nm}$), los valores de viscosidad de las mezclas biodiesel + MgO son semejantes a la viscosidad del biodiésel puro con una desviación promedio de 1.1% , mientras a tamaño de cluster superiores esta diferencia se incrementa hasta en un 7.5% ; esta condición sucede a una concentración de $65\ \mu\text{mol/L}$ y un tamaño de cluster de $9.3\ \mu\text{m}$ (tamaño de cristal $49.7\ \text{nm}$). No obstante, a concentraciones de 35 , 85 y $100\ \mu\text{mol/L}$ de MgO y tamaños de cluster de $12.9\ \mu\text{m}$ y $6.5\ \mu\text{m}$, la viscosidad disminuye favoreciendo el cumplimiento con la norma EN14214 para el biodiésel como se observa en la Figura 12. El efecto del tamaño de cristal del MgO sobre la viscosidad de la mezcla se ve reflejado a tamaños de cluster a partir de $6.5\ \mu\text{m}$ a todas las temperaturas.

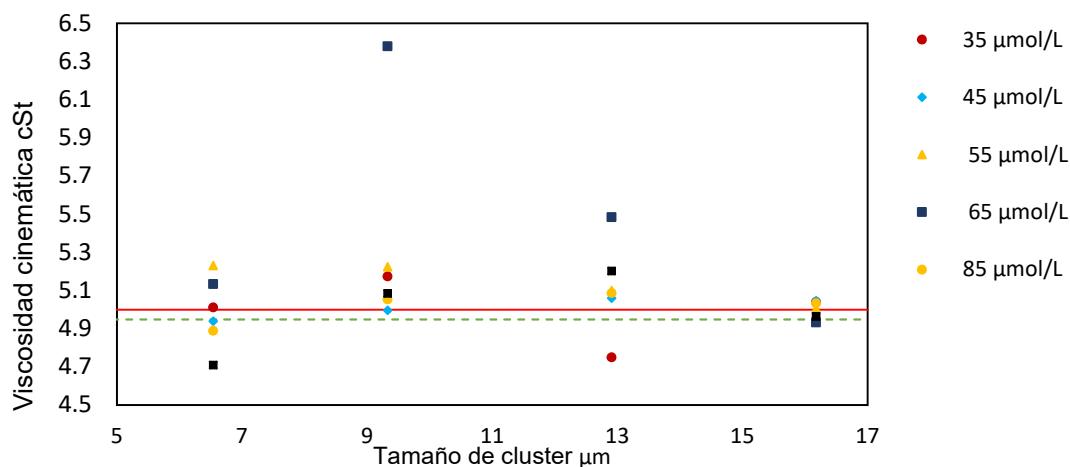


Figura 12. Viscosidad cinemática de mezclas biodiésel-MgO a 40°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.

La Figura 13 muestra el comportamiento de la viscosidad con respecto a la concentración del MgO a tamaño de cristal de 49.7 nm y tamaño de cluster de 9.3 μm desde (288.15 a 338.15) K, el cual mostró el mayor efecto sobre la viscosidad. Se puede apreciar un incremento de viscosidad a concentraciones de (35 a 65) $\mu\text{mol/L}$ a temperaturas de (288.15 a 308.15) K, mientras que a concentraciones superiores los valores de viscosidad disminuyen.

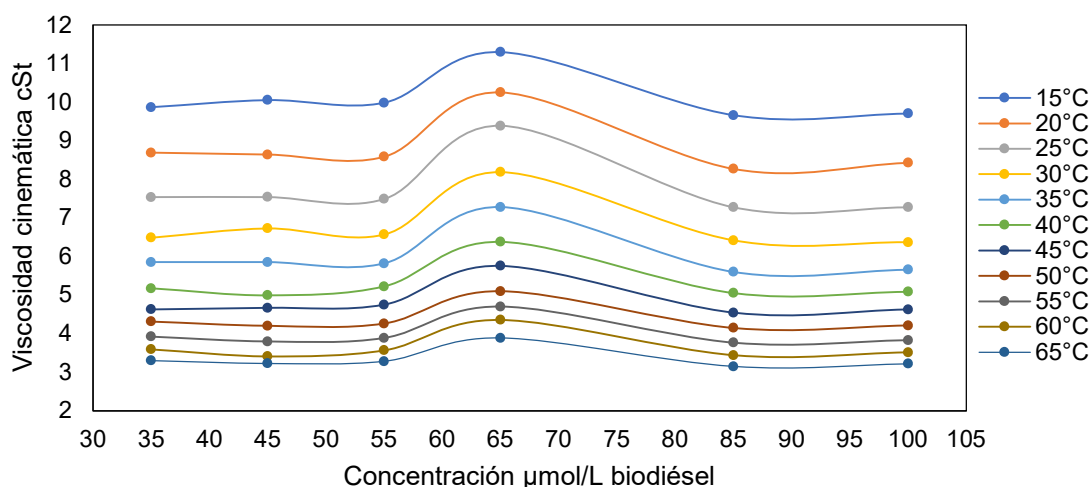


Figura 13. Viscosidad cinemática de mezclas Biodiésel-MgO (49.7 nm – 9.3 μm) con variaciones en la concentración y la temperatura

Valores de viscosidad de la mezclas biodiesel + MgO fueron correlacionados utilizando modelos teóricos reportados por Einstein⁴³ y Wang⁴⁴ con la finalidad de poder explicar el tipo de interacciones presentes en la mezcla.

El modelo de Einstein es un modelo de viscosidad para líquidos con partículas sólidas en suspensión, conocidos como nanofluidos, en función de su fracción volumétrica (Ecuación 4), Einstein plantea que la viscosidad tiene una tasa de cambio constante conocida como viscosidad intrínseca. La viscosidad intrínseca es una medida del aumento de la viscosidad del fluido puro con respecto a la forma de las partículas en suspensión, que para el modelo de Einstein son partículas esféricas cuya viscosidad intrínseca es 2.5⁴⁵. También se asume que las partículas se encuentran altamente diluidas por lo que solo es

válido para fracciones volumétricas menores a 0.02. A partir del modelo de Einstein han surgido varios modelos teóricos como el modelo de Wang (Ecuación 5), en este modelo considera las interacciones entre partículas y el movimiento Browniano.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi) \quad (4)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 7.5\varphi + 123\varphi^2) \quad (5)$$

Donde:

μ_{nf} = viscosidad del nanofluido

μ_{bf} = viscosidad del fluido base

φ =Fracción volumétrica

La Figura 14 muestra una comparación de los modelos de Einstein y Wang con los datos experimentales. Para ambos modelos se observa una subestimación de la viscosidad con respecto al cambio en la fracción volumétrica, esto radica principalmente en que para ambos modelos se hace la suposición de que los sólidos se encuentran altamente dispersos en el líquido, por lo que no toma en cuenta dos de los efectos principales que influyen en el aumento de la viscosidad para los nanofluidos que son: la formación de aglomerados de moléculas de óxido de magnesio y la formación de una película de alta densidad del fluido base sobre la superficie de las partículas conocida como nanocapa⁴⁶.

Se observó que para las primeras 4 concentraciones la viscosidad mostró un incremento constante por lo que a ese rango de los datos se le realizó un ajuste lineal (Ecuación 6) y se comparó con el modelo de Einstein. Seguidamente se realizó un ajuste cuadrático (Ecuación 7) a todo el rango de concentraciones para realizar una comparación con el modelo de Wang.

$$\mu_{nf} = 0.8067 * \mu_{bf}(1 + 375\varphi) \quad (6)$$

$$\mu_{nf}=0.7213*\mu_{bf}(1 + 1233.23\varphi + 750994.73\varphi^2) \quad (7)$$

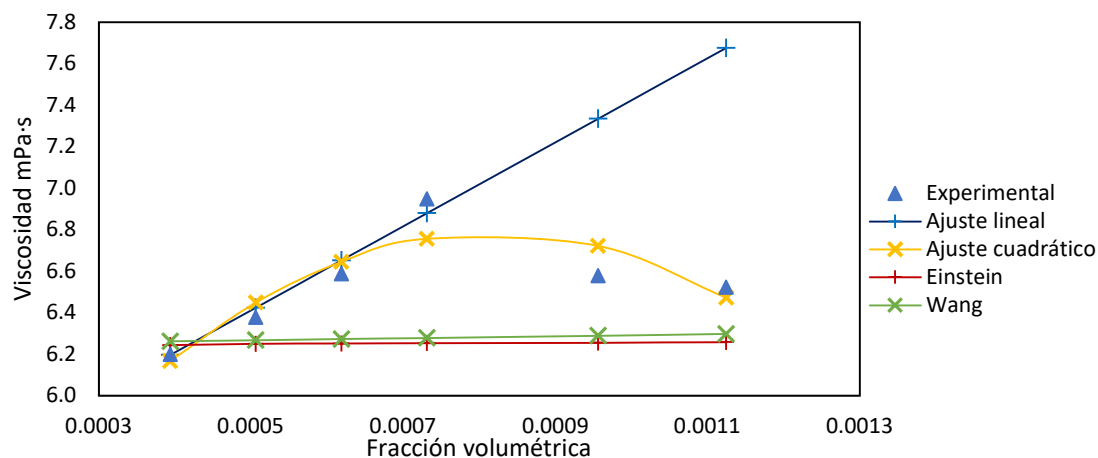


Figura 14. Comparación de los datos de viscosidad experimentales a 25°C con modelos teóricos y los ajustes propuestos por esta investigación

Los ajustes propuestos consistieron en estimar los términos de viscosidad intrínseca y aportación de los aglomerados mediante regresiones lineales y cuadráticas de los datos experimentales e implementar un factor de contribución que multiplica a toda la expresión.

El incremento de la viscosidad al adicionar el MgO se debe a la que las partículas del óxido actúan como obstáculos que incrementan la resistencia al flujo del biodiésel, provocando cambios en las líneas de flujo debido a una disipación de la energía⁴⁷. Este fenómeno se ve incrementado por la formación de aglomerados de partículas del óxido lo cual ocurre al incrementar la fracción volumétrica.

Otro de los efectos que contribuye al incremento de la viscosidad puede ser la formación una nanocapa ordenada de moléculas de ésteres sobre la superficie del óxido, así como también de los aglomerados de partículas debido a fuerzas de Van der Waals y Coulomb en la interfase sólido-líquido⁴⁸. Por otro lado, las moléculas de líquido sobre nanocapa está distribuidas de una manera uniforme tal que adopta un comportamiento similar al estado sólido, aumentando la resistencia al flujo y por ende provocando aumentos en la viscosidad del fluido.

El tamaño de partícula está directamente ligado a la influencia de la nanocapa debido a que tamaños de partícula pequeño implican un área superficial más grande, por lo que hay una mayor interacción de las partículas con el líquido provocando un aumento en la formación de nanocapas y reduciendo la cantidad de moléculas de fluido libres aumentando la viscosidad.

Por otro lado la dispersión del tamaño de partícula tiene influencia sobre la viscosidad, una distribución de tamaño de partícula de amplio espectro consiste en partículas de tamaño diferente, pequeñas y grandes (polidispersión), que pueden empaquetarse de manera más eficiente en comparación con un grupo de igual masa y partículas con un tamaño uniforme (monodispersión), El empaquetamiento que ocurre en grupos de partículas polidispersas proporciona más espacio libre entre las partículas y facilita el movimiento de un volumen equivalente de moléculas del fluido base, reduciendo la viscosidad⁴⁹.

La Figura 15 muestra la variación de la viscosidad con respecto al tamaño de partícula del MgO en suspensión. Se puede apreciar un incremento de la viscosidad desde el tamaño de 6.5 μm hasta 9.3 μm en donde alcanza un valor máximo, seguido de una disminución de los valores de viscosidad conforme aumenta el tamaño de partícula.

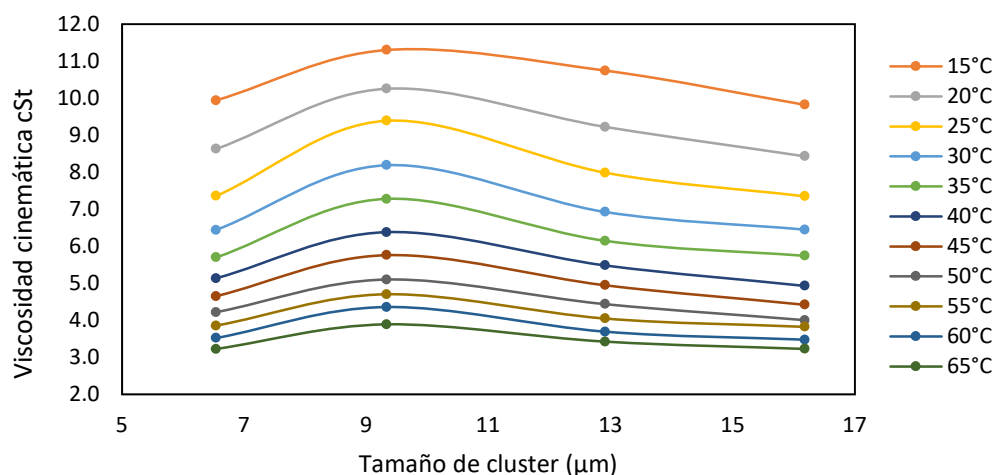


Figura 15. Viscosidad cinemática de mezclas de biodiésel-MgO a una concentración constante (65 $\mu\text{mol/L}$) con variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.

El máximo valor de viscosidad en la muestra de tamaño de cluster de $9.3\ \mu\text{m}$ se debe al tipo de polidispersión que presenta, en la distribución del tamaño de cluster (Figura A2-Anexo A) se aprecia que la muestra está conformada de proporciones similares de tamaños de cluster menores a $3\ \mu\text{m}$ y mayores a $80\ \mu\text{m}$, respecto al tamaño medio ($9.3\ \mu\text{m}$), esta distribución permite que las partículas pequeñas ocupen los espacios entre las partículas de tamaño medio y grande, lo cual hace que disminuya la fracción de espacio vacío, aumentando las interacciones entre las partículas de óxido y como consecuencia aumentando la resistencia al flujo. La muestra de $6.5\ \mu\text{m}$ posee una mayor proporción de partículas pequeñas (menores a $3\ \mu\text{m}$) que de partículas grandes (mayores a $80\ \mu\text{m}$) respecto al tamaño medio (Figura A4) en comparación con la muestra de $9.3\ \mu\text{m}$, por lo cual existe una mayor fracción vacía y por consiguiente presenta una menor resistencia al flujo.

Para los tamaños de cluster superiores a $9.3\ \mu\text{m}$ la fracción de tamaños inferiores ($3\ \mu\text{m}$), disminuye conforme aumenta el tamaño medio de cluster, por lo cual aumenta la fracción vacía entre partículas disminuyendo la resistencia al flujo, como se muestra en la Figura 16.

La Figura 16 muestra los diferentes tipos de polidispersión que se presentan con respecto a los valores de viscosidad cinemática.

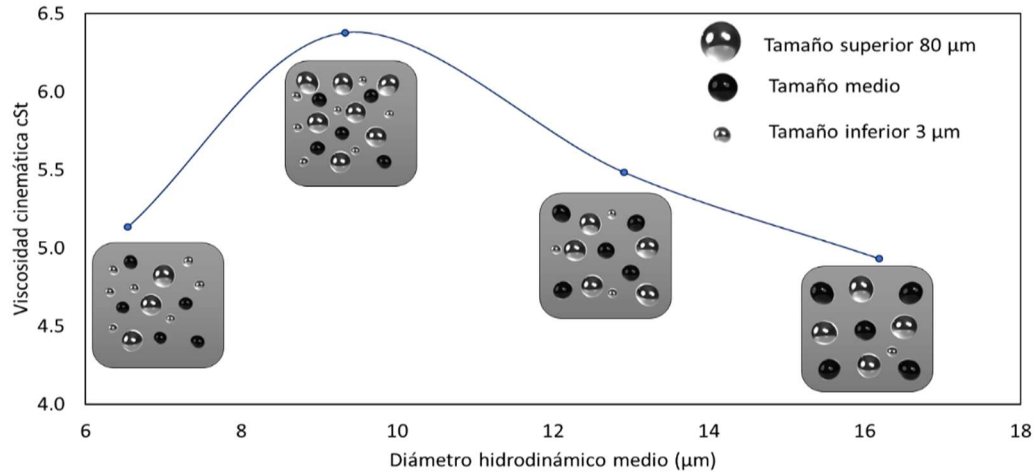


Figura 16. Polidispersión de los diferentes diámetros hidrodinámicos medios (tamaño de cluster) de los polvos de MgO.

6.4.2.2. Densidad

La densidad aumenta conforme aumenta la temperatura (Figura 18) para todas las mezclas de biodiésel + óxido de magnesio debido a una expansión volumétrica del fluido producto del aumento en la energía cinética del sistema.

Para tamaños de cluster de 6.5, 12.9 y 16.1 μm , los valores de la densidad de las mezclas biodiésel + MgO son semejantes a la densidad del biodiésel puro con una desviación promedio de 0.11%, como se observa en la Figura 17. Mientras que a tamaños de cluster de 9.3 μm esta diferencia se incrementa hasta un 0.21%. El efecto del tamaño de cluster del MgO sobre la densidad se ve reflejado a tamaños superiores a 6.5 μm para todas las temperaturas.

La Figura 18 muestra el comportamiento de la densidad con respecto a la concentración del MgO a tamaño de cluster de 9.3 μm y desde (288.15 a 338.15) K, el cual mostró el mayor efecto sobre la densidad. Se puede apreciar que el mayor incremento ocurre a una concentración de 65 $\mu\text{mol/L}$.

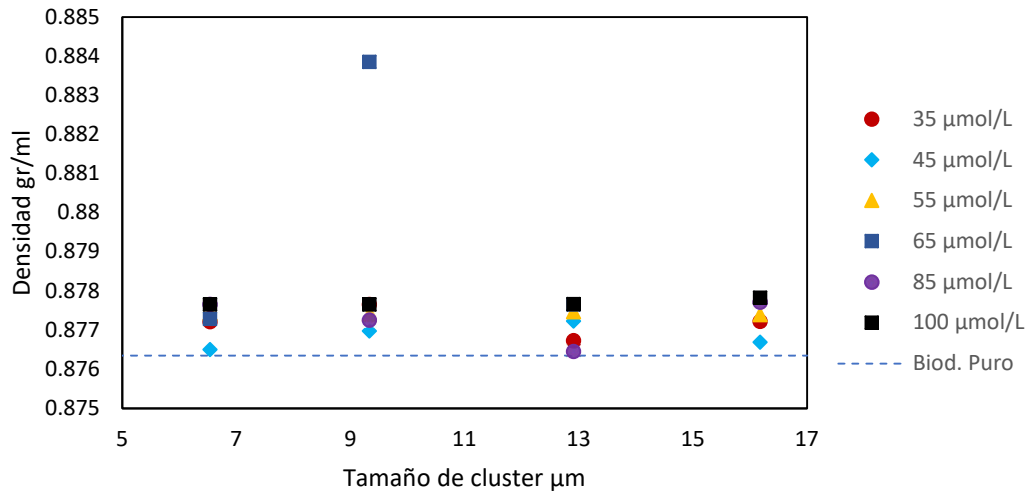


Figura 17. Densidad de mezclas biodiésel-MgO medida a 15°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.

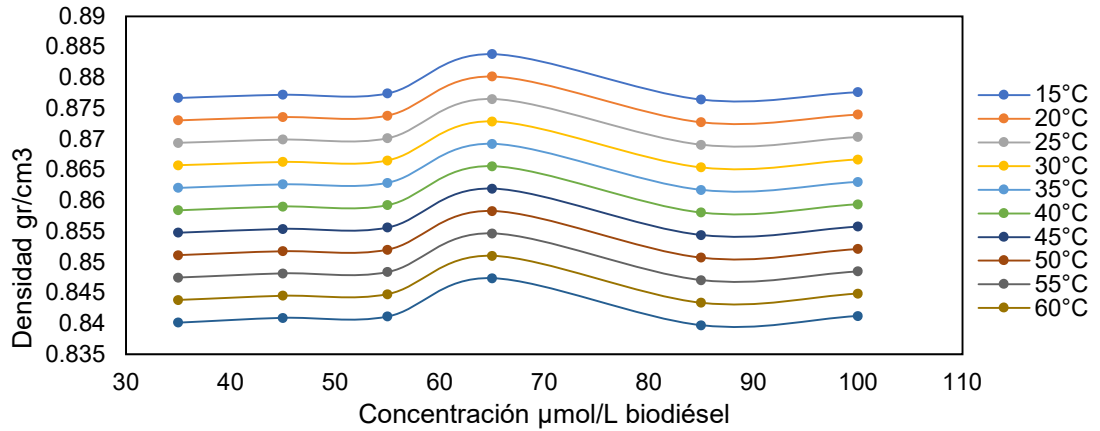


Figura 18. Densidad de mezclas biodiésel- MgO (49.7nm - 9.3 μm) con variaciones en la concentración y la temperatura.

Valores de densidad de las mezclas de biodiésel + MgO fueron correlacionados utilizando el modelo teórico de Pak y Cho (Ecuación 8) con la finalidad de poder explicar el tipo de interacciones presentes en la mezcla.

$$\rho_{nf} = \varphi \cdot \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (8)$$

ρ_{nf} = densidad del nanofluido.

ρ_f = densidad del fluido base.

ρ_p = densidad de la partícula.
 ϕ =Fracción volumétrica

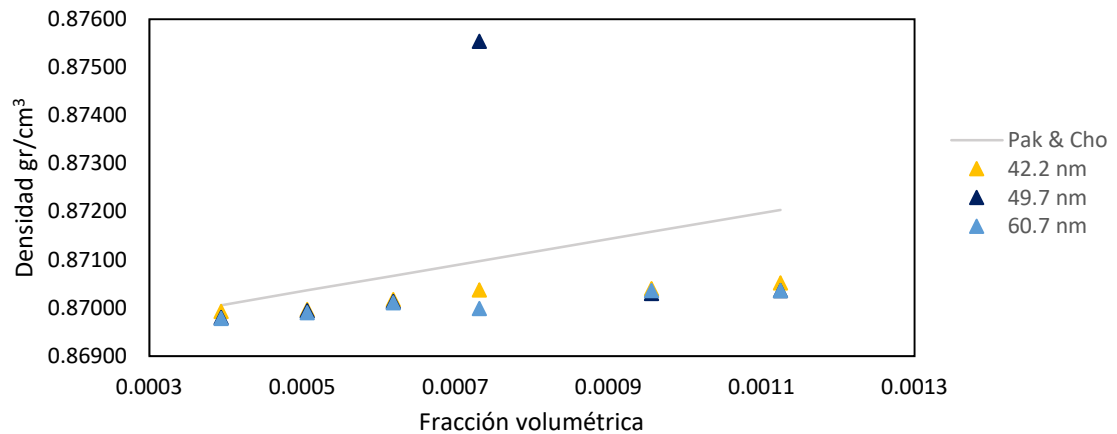


Figura 19. Comparación de los datos experimentales de densidad a 25°C con el modelo teórico de Pak & Cho.

En la Figura 19 se puede apreciar que la diferencia entre el modelo de Pak y Cho presenta valores mayores a los datos experimentales con un error promedio de 0.13%, El modelo supone un comportamiento ideal de mezcla para dos componentes, por lo que no tiene en cuenta el efecto de la nanocapa sobre la densidad. Al estar en un estado pseudosólido, la nanocapa presenta un valor de densidad diferente a el óxido y el biodiésel, por lo cual debe considerarse como un tercer componente de la mezcla para obtener un mejor ajuste a los valores de densidad reales⁴⁶.

La Figura 20 muestra un incremento de la densidad entre el tamaño de cluster de 6.5 μm y 9.3 μm , a partir de este punto los valores de densidad disminuyen conforme aumenta el tamaño de cluster. La muestra con tamaño de cluster de 9.3 μm posee una menor fracción de espacio vacío debido a la polidispersión que presenta (Figura 16), incrementando la densidad de la muestra a un punto máximo.

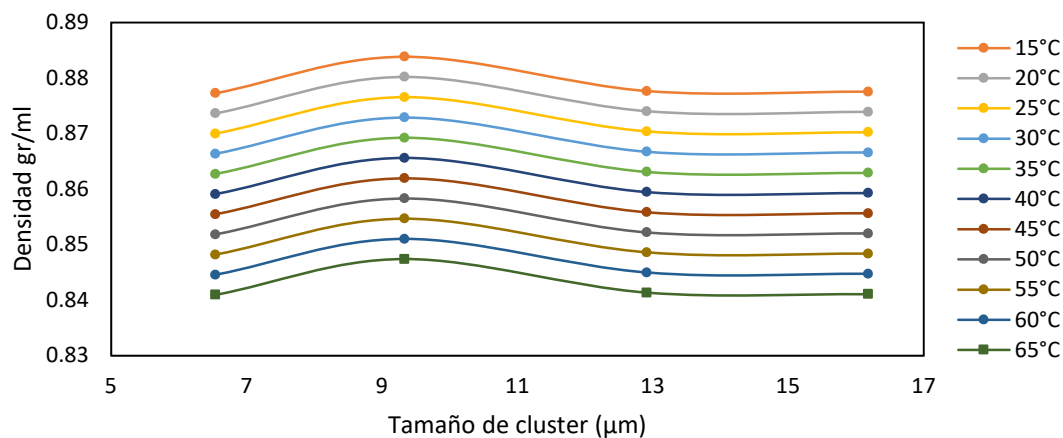


Figura 20. Densidad de mezclas biodiésel-MgO a 65 µmol/L para diferentes tamaños de cluster.

Así mismo se puede apreciar que para las muestras con tamaños de cluster superiores a 9.3 µm la densidad disminuye, esto se debe al aumento en el tamaño de cluster medio y a la disminución de la fracción de clusters inferiores a 3 µm, respecto al tamaño de cluster medio, ya que estos dos factores propician el aumento del espacio libre entre las moléculas y por ende una menor cantidad de óxido por unidad de volumen.

6.4.2.3. Índice de refracción

El índice de refracción disminuye conforme aumenta la temperatura (Figura 22) para todas las mezclas de biodiésel + óxido de magnesio debido al aumento de la densidad por el incremento en la energía cinética del sistema.

Para tamaños de cluster de 16.1 µm, los valores del índice de refracción de las mezclas biodiésel + MgO son semejantes al índice de refracción del biodiésel puro con una desviación promedio de 0.01%. Mientras que a tamaños superiores esta se incrementa en un 0.03%, esta condición sucede a una concentración de 65 µmol/L y un tamaño de cluster de 9.3 µm. El efecto del tamaño de cluster del MgO sobre el índice de refracción se ve reflejado a tamaños superiores a 6.5 µm a todas las temperaturas.

La Figura 22 muestra el comportamiento del índice de refracción con respecto a la concentración de MgO a tamaño de cluster de 9.3 μm y desde (288.15 a 315.15) K, el cual mostró el mayor efecto sobre el índice de refracción. Se puede apreciar un incremento del índice de refracción a concentraciones de (35 a 65) $\mu\text{mol/L}$ a todas las temperaturas. Mientras que a concentraciones superiores los valores de índice de refracción disminuyen.

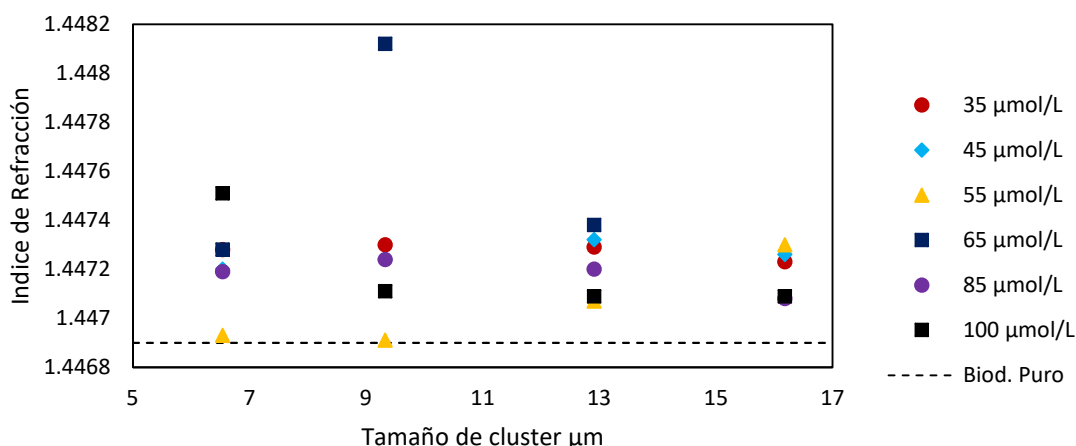


Figura 21. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MgO a 25°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.

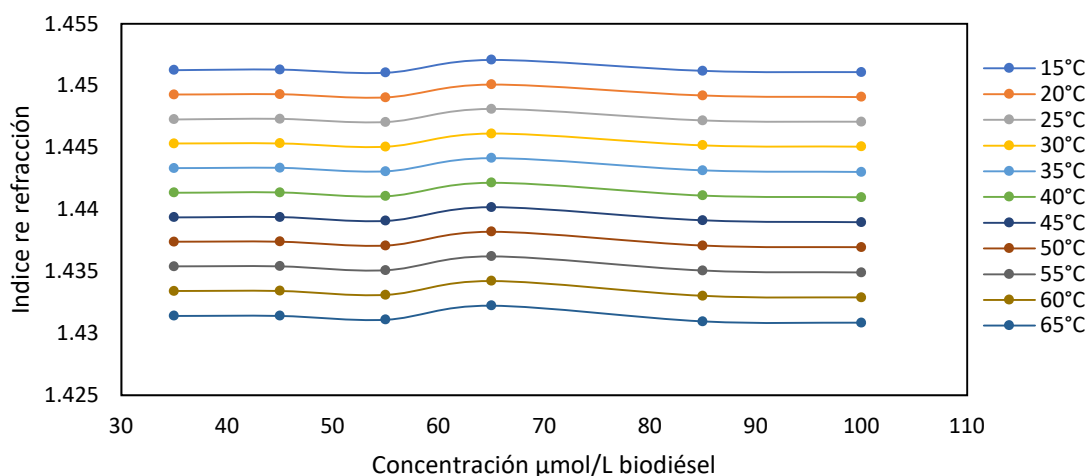


Figura 22. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MgO (49.7 nm - 9.3 μm) a diferentes concentraciones y temperaturas.

Valores de índice de refracción de las mezclas biodiésel + MgO fueron correlacionados utilizando el modelo teórico de la dispersión de Rayleigh con la finalidad de poder explicar el tipo de interacciones presentes en la mezcla.

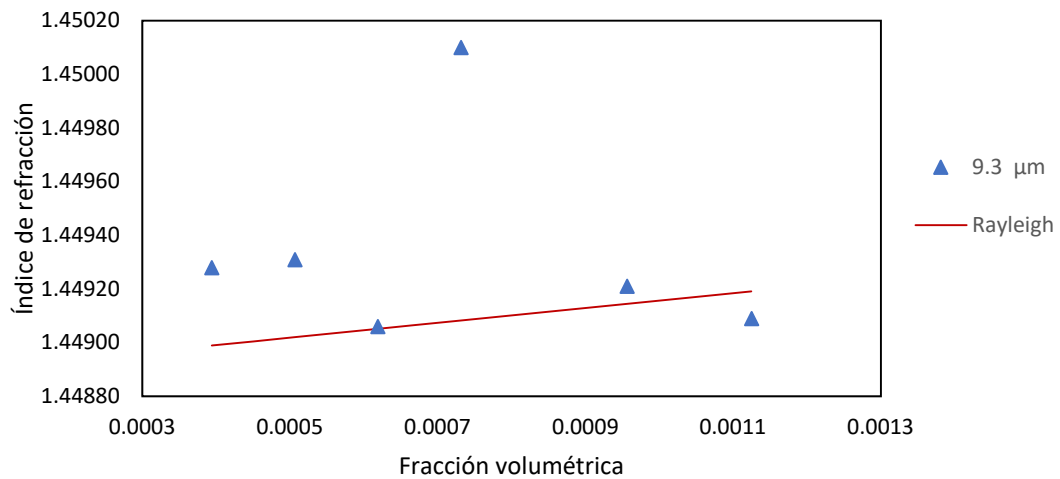


Figura 23. Comparación de los valores experimentales de índice de refracción con el modelo teórico de Rayleigh.

La ecuación de Rayleigh (Ecuación 9) relaciona el índice de refracción para mezclas bifásicas en función de la concentración volumétrica.

$$n_{nf} = m_1 + x(m_2 - m_1) \quad ; \quad x = \frac{3}{2} \cdot \frac{(m+1)}{(m^2+2)} \quad (9)$$

Donde:

m_1 = índice de refracción del fluido puro

m_2 = índice de refracción del material sólido

$m = m_1/m_2$

La Figura 23 muestra que los valores experimentales no se ajustan al modelo, presentando un error promedio de 0.01%, esto se debe a que el modelo de Rayleigh asume condiciones ideales como una alta disolución y una interacción

nula entre partículas sólida por lo que solo se ajusta para concentraciones muy pequeñas, también asume que el tamaño de partícula tiene un valor máximo de $d < \lambda/10$. El índice de refracción fue medido usando una radiación $\lambda = 589.3$ nm, por lo que el rango de validez del modelo del modelo son tamaños menores a 59 nm. La diferencia entre el modelo teórico y los datos experimentales podría deberse a las mezclas pueden presentar formación de aglomerados y adicionalmente los tamaños de partícula de las muestras podrían ser superiores a 59 nm.

La Figura 24 muestra un incremento de los valores de índice de refracción entre el tamaño de cluster de 6.5 μm y 9.3 μm , a partir de este punto los valores de índice de refracción disminuyen conforme aumenta el tamaño de cluster.

La muestra con tamaño de cluster de 9.3 μm tiene un menor espaciamiento entre las partículas sólidas debido a la polidispersión que presenta (Figura 16), resultando en un mayor índice de refracción. En las muestras con tamaños de cluster superiores a 9.3 μm el índice de refracción tiende a disminuir, debido al aumento en el tamaño de cluster medio y a la disminución de la fracción de clusters menores a 3 μm , ya que estos dos factores propician el aumento del espacio libre entre las moléculas, disminuyendo el índice de refracción.

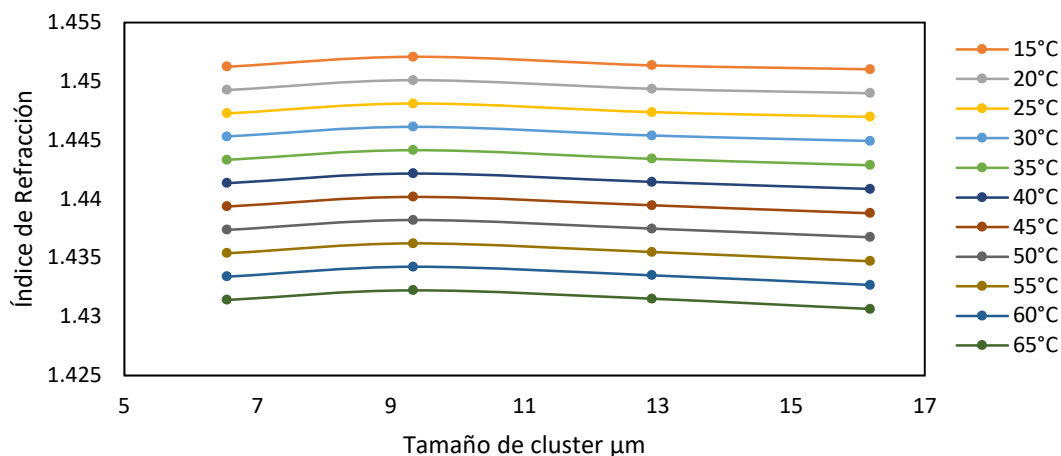


Figura 24. Índice de refracción de mezclas de biodiésel-MgO a 65 µmol/L con variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.

6.4.3. Determinación experimental de propiedades fisicoquímicas a mezclas de biodiésel-óxido de manganeso.

Las mezclas de biodiésel-MnO fueron preparadas utilizando polvos de MnO con 3 diferentes tamaños de cristal (84.4, 85.3, y 94.4 nm) y de cluster (5.9, 8.7 y 12.3 µm) en concentraciones de 35, 45, 55, 65, 85 y 100 µmol_{MnO}/L_{biodiésel}. Se realizaron mediciones experimentales de viscosidad, densidad e índice de refracción para cada una de las mezclas (Anexos E, F y G). Las tres propiedades fueron medidas de 288.15 a 338.15K a presión atmosférica. A continuación, se presentan los resultados y el respectivo análisis de cada propiedad medida.

6.4.3.1. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática disminuye conforme aumenta la temperatura (Figura 26) para todas las mezclas de biodiésel + óxido de manganeso debido a un incremento en la energía cinética del sistema, favoreciendo una disminución de las fuerzas de cohesión y desagrupamiento entre las moléculas.

Para tamaños de cluster de 12.7 µm (tamaños de cristal de 5 nm), los valores de viscosidad de las mezclas biodiesel + MnO son semejantes a la viscosidad del biodiésel puro con una desviación promedio de 2.6%, mientras a tamaño de

cluster inferiores esta diferencia se incrementa hasta un 10.4%; esta condición sucede a una concentración de 65 $\mu\text{mol/L}$ y un tamaño de cluster de 8.7 μm (tamaño de cristal 94.4 nm). No obstante, a concentraciones de 45 $\mu\text{mol/L}$ de MnO y tamaños de cluster de 5.9 μm y 6.58.7 μm , la viscosidad disminuye como se observa en la Figura 25. El efecto del tamaño de cluster del MnO sobre la viscosidad de la mezcla se ve reflejado a tamaños de cluster a partir de 5.9 μm a todas las temperaturas.

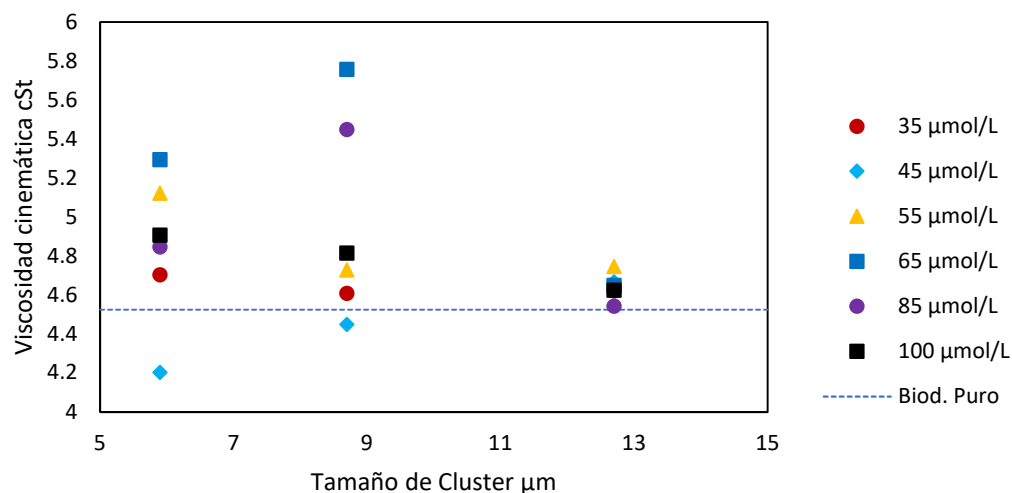


Figura 25. Viscosidad de mezclas de biodiésel-MnO con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.

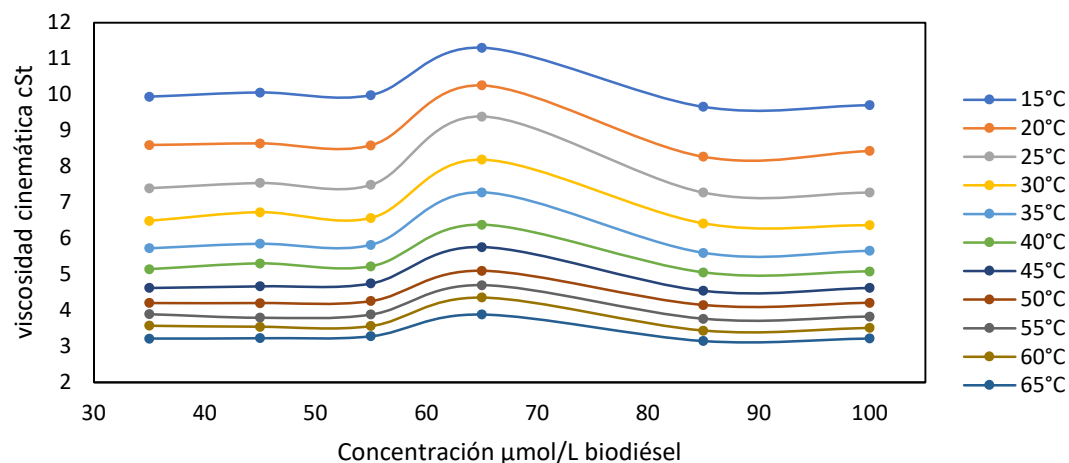


Figura 26. Viscosidad de mezclas de biodiésel-MnO de 12.7 μm con variaciones en la concentración y la temperatura.

La Figura 26 muestra el comportamiento de la viscosidad con respecto a la concentración del MnO a tamaño de cluster de 12.7 μm desde (288.15 a 338.15) K. Se puede apreciar un incremento de viscosidad a concentraciones de (35 a 65) $\mu\text{mol/L}$, mientras que a concentraciones superiores los valores de viscosidad disminuyen.

El incremento de la viscosidad al adicionar el MnO se debe a la que las partículas del óxido actúan como obstáculos que incrementan la resistencia al flujo del biodiésel, provocando cambios en las líneas de flujo debido una disipación de la energía⁴⁷. Este fenómeno se ve incrementado por la formación de aglomerados de partículas del óxido lo cual ocurre al incrementar la fracción volumétrica.

Valores de viscosidad de la mezclas biodiesel + MnO fueron correlacionados utilizando modelos teóricos reportados por Einstein⁴³ y Wang⁴⁴ con la finalidad de poder explicar el tipo de interacciones presentes en la mezcla.

La Figura 27 muestra una comparación de los modelos de Einstein y Wang con los datos experimentales. Para ambos modelos se observa una subestimación de la viscosidad con respecto al cambio en la fracción volumétrica, esto se debe a que en ambos modelos se supone que los sólidos se encuentran altamente dispersos en el fluido, por lo que no toma en cuenta dos de los efectos principales que influyen en el aumento de la viscosidad para los nanofluidos que son: la formación de aglomerados de moléculas de óxido y la formación de la nanocapa⁴⁶.

Se observó que para las primeras 4 concentraciones la viscosidad mostró un incremento constante por lo que a ese rango de los datos se le realizó un ajuste lineal (Ecuación 10) y se comparó con el modelo de Einstein. Seguidamente se realizó un ajuste cuadrático (Ecuación 11) a todo el rango de concentraciones para realizar una comparación con el modelo de Wang.

$$\mu_{nf}=0.55\mu_{bf}(1 + 1693.34\varphi) \quad (10)$$

$$\mu_{nf}=0.2830\mu_{bf}(1 + 7646.13\varphi + 461358.1\varphi^2) \quad (11)$$

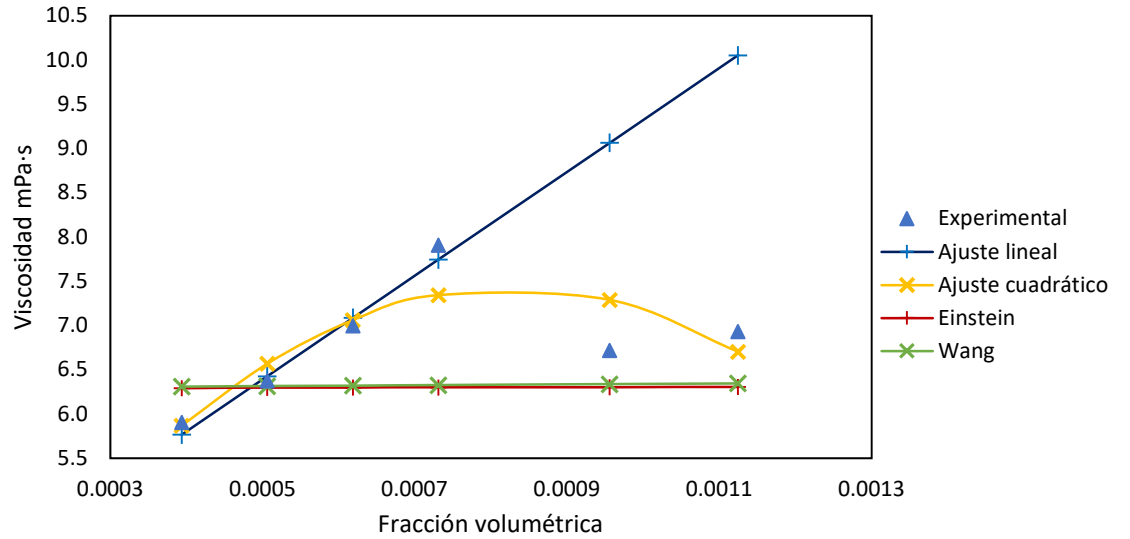


Figura 27. Comparación de los datos experimentales de viscosidad de mezclas de biodiésel-MnO a 25°C con modelos teóricos y los ajustes propuestos por esta investigación.

Los ajustes propuestos consistieron en estimar los términos de viscosidad intrínseca y aportación de los aglomerados mediante regresiones lineales y cuadráticas de los datos experimentales e implementar un factor de contribución que multiplica a toda la expresión.

La Figura 28 muestra la variación de la viscosidad con respecto al tamaño de cluster del MnO en suspensión. Se puede apreciar un incremento de la viscosidad desde el tamaño de 5.9 μm hasta 8.7 μm en donde alcanza un valor máximo, seguido de una disminución de los valores de viscosidad conforme aumenta el tamaño de cluster.

El máximo valor de viscosidad en el tamaño de partícula de 8.7 μm se debe a la monodispersión de la muestra de óxido (Figura A6), seguida por la

polidispersión de la muestra con tamaño de cluster de 12.7 nm (Figura A5). En este caso la polidispersión hace que el óxido tenga un mejor empaquetamiento y que muestra tenga más espacio libre de óxido en comparación con la muestra monodispersa, reduciendo la resistencia al flujo como se muestra en la Figura 29.

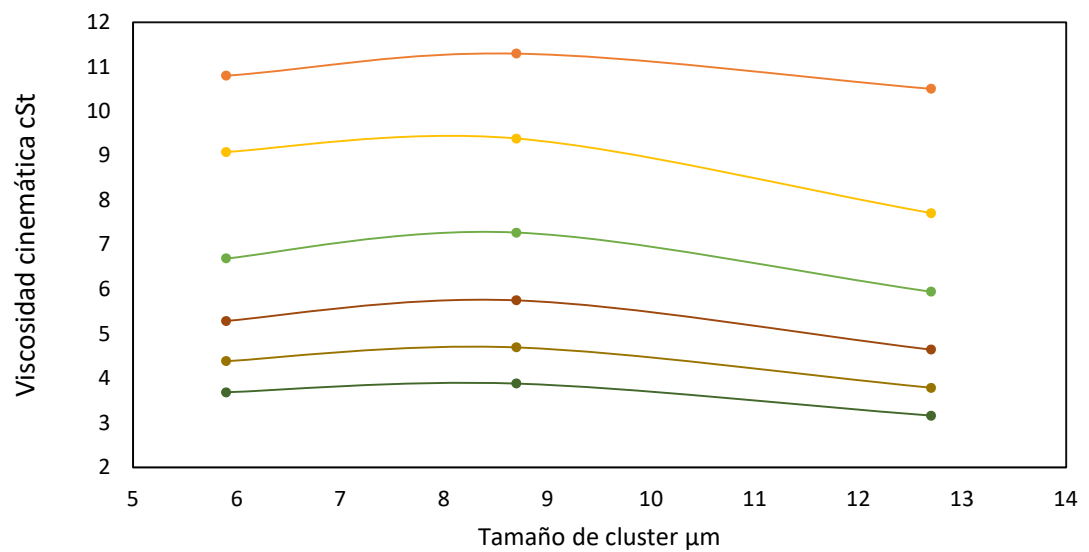


Figura 28. Viscosidad cinemática de muestras biodiésel-MnO a $65\mu\text{mol/L}$ con variaciones en el tamaño de cluster.

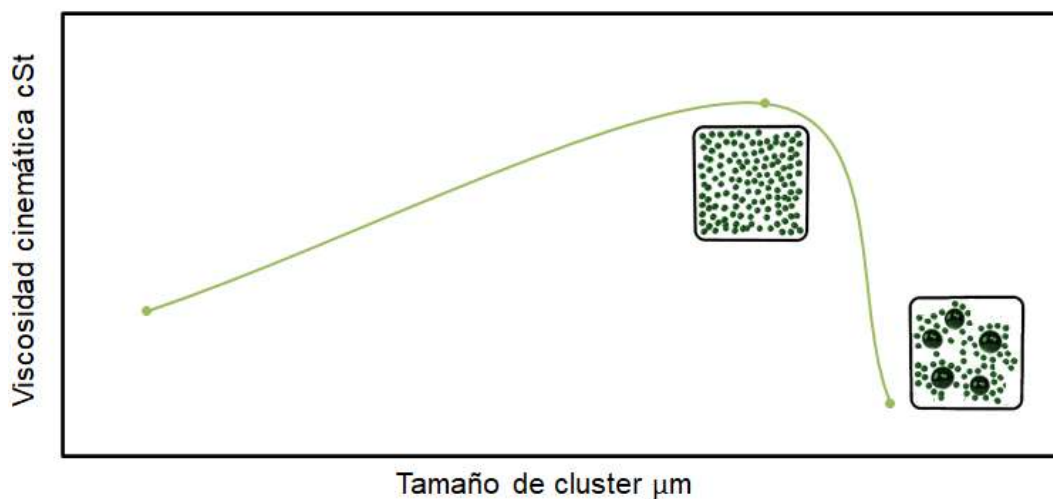


Figura 29. Efecto de la polidispersión para el sistema MnO-biodiésel.

6.4.3.2. Densidad

La densidad aumenta conforme aumenta la temperatura (Figura 31) para todas las mezclas de biodiésel + óxido de manganeso debido a una expansión volumétrica del fluido producto del aumento en la energía cinética del sistema.

Para el tamaño de cluster de 12.3 μm , los valores de la densidad de las mezclas biodiésel + MnO son semejantes a la densidad del biodiésel puro con una desviación promedio de 0.12%, como se observa en la Figura 30. Mientras que a tamaños de cluster de 8.7 μm esta diferencia se incrementa hasta un 1.92%. El efecto del tamaño de cluster del MnO sobre la densidad se ve reflejado a tamaños inferiores a 12.7 μm para todas las temperaturas.

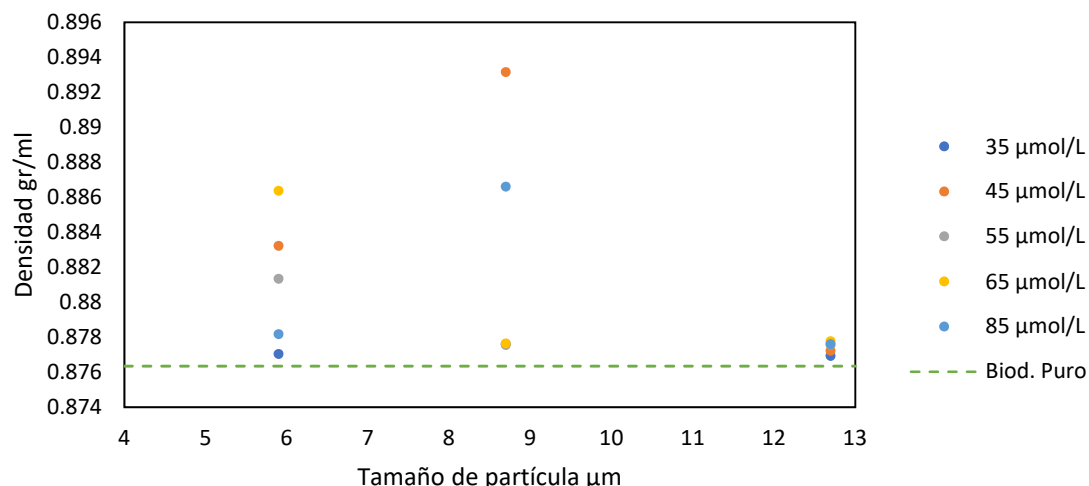


Figura 30. Densidad de mezclas biodiésel-MnO a 15°C con variaciones en el tamaño de partícula y la concentración.

La Figura 31 muestra el comportamiento de la densidad con respecto a la concentración del MnO a tamaño de cluster de 8.7 μm desde (288.15 a 338.15) K, el cual mostró el mayor efecto sobre la densidad. Se puede apreciar que el mayor incremento ocurre a una concentración de 45 $\mu\text{mol/L}$.

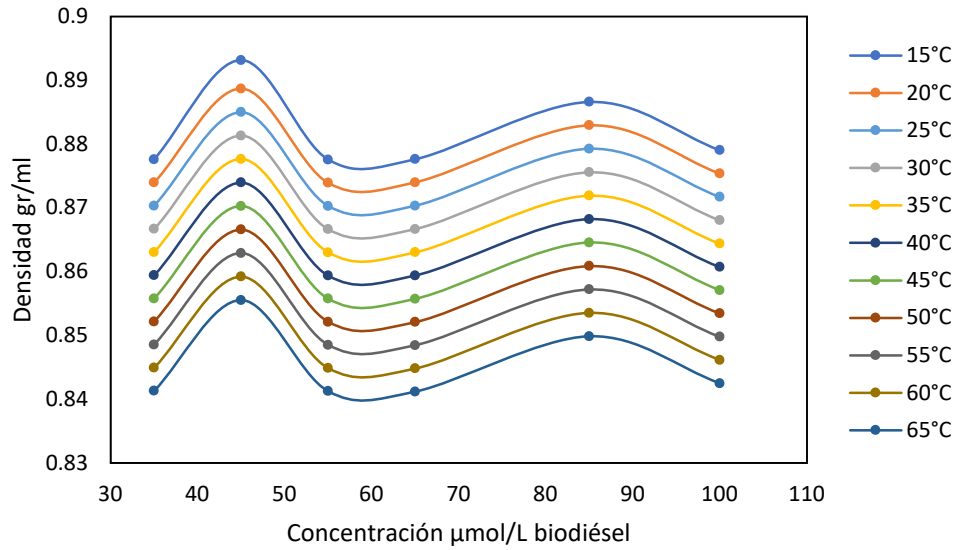


Figura 31. Densidad de mezclas biodiésel-MnO con tamaño de cluster de 8.7 μm con variaciones en la concentración y la temperatura.

Valores de densidad de las mezclas de biodiésel + MnO fueron correlacionados utilizando el modelo teórico de Pak y Cho (Ecuación 8) con la finalidad de poder explicar el tipo de interacciones presentes en la mezcla.

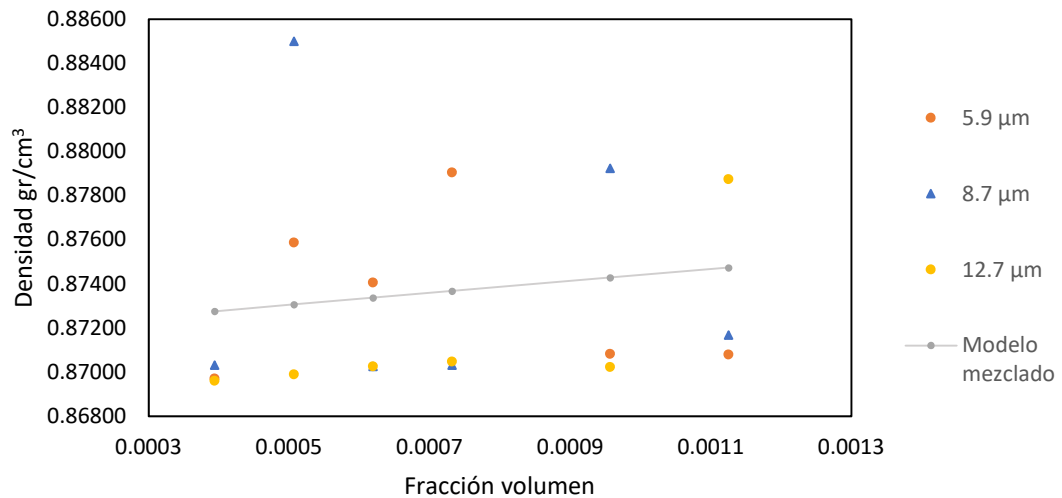


Figura 32. Comparación de los datos experimentales de densidad de mezclas biodiésel-MnO a 25°C con el modelo teórico de Pak & Cho.

En la Figura 32 se puede apreciar que la diferencia entre el modelo de Pak y Cho presenta valores mayores a los datos experimentales con un error promedio máximo de 0.4%, los datos experimentales no se adaptan a los datos teóricos debido a que el modelo de Pak & Cho supone un comportamiento ideal de mezcla para dos componentes, por lo que no tiene en cuenta el efecto de la nanocapa sobre la densidad, también asume que las partículas se encuentran altamente dispersadas por lo que no tiene en cuenta la polidispersión ni la formación de aglomerados.

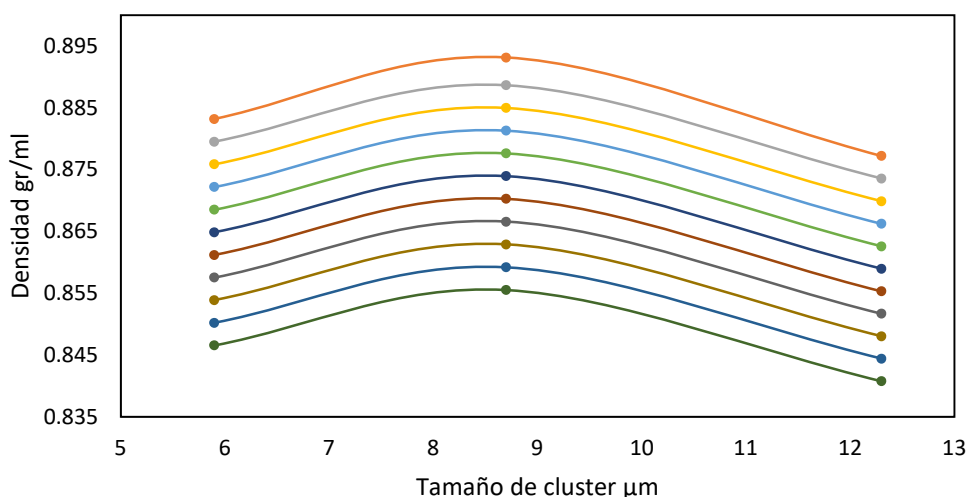


Figura 33. Densidad de mezclas biodiésel-MnO a 45 $\mu\text{mol/L}$ con variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.

La Figura 33 muestra la variación de la densidad con respecto al tamaño de cluster de MnO a una concentración de 45 $\mu\text{mol/L}$, presentado un incremento en la densidad de 5.9 μm a 8.7 μm , seguida de una disminución en la propiedad para el tamaño de 12.9 μm

La muestra con tamaño de cluster de 8.7 μm presenta un valor máximo de densidad debido que es monodispersa (Figura A6), mientras que la muestra con tamaño de cluster de 12.7 μm presenta polidispersión (Figura A5). La polidispersión de la muestra de 12.7 μm genera un mejor empaquetamiento, por

lo que hay menos clusters de óxido en un volumen determinado de muestra en comparación con la muestra monodispersa como se muestra en la figura 28.

6.4.3.3. Índice de refracción

Para la muestra con tamaño de cluster de 12.3 μm , los valores de índice de refracción de las mezclas biodiésel + MnO son semejantes a la densidad del biodiésel puro con una desviación promedio de 0.04%, como se observa en la Figura 34. Mientras que en el tamaño de partícula de 8.7 μm esta diferencia se incrementa hasta un 0.06%. El efecto del tamaño de cluster del MnO sobre la densidad se ve reflejado a tamaños inferiores a 12.3 μm para todas las temperaturas.

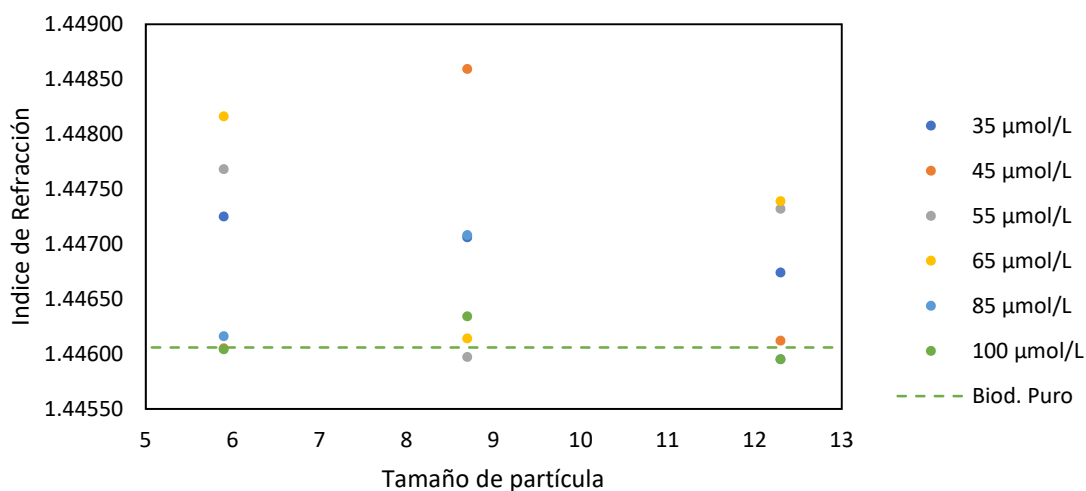


Figura 34. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MnO a 25°C con variaciones en el tamaño de cluster y la concentración.

La Figura 35 muestra el comportamiento de la densidad con respecto a la concentración del MnO a tamaño de cluster de 8.7 μm y desde (288.15 a 338.15) K, el cual mostró el mayor efecto sobre la densidad. Se puede apreciar que el mayor incremento ocurre a una concentración de 45 $\mu\text{mol/L}$.

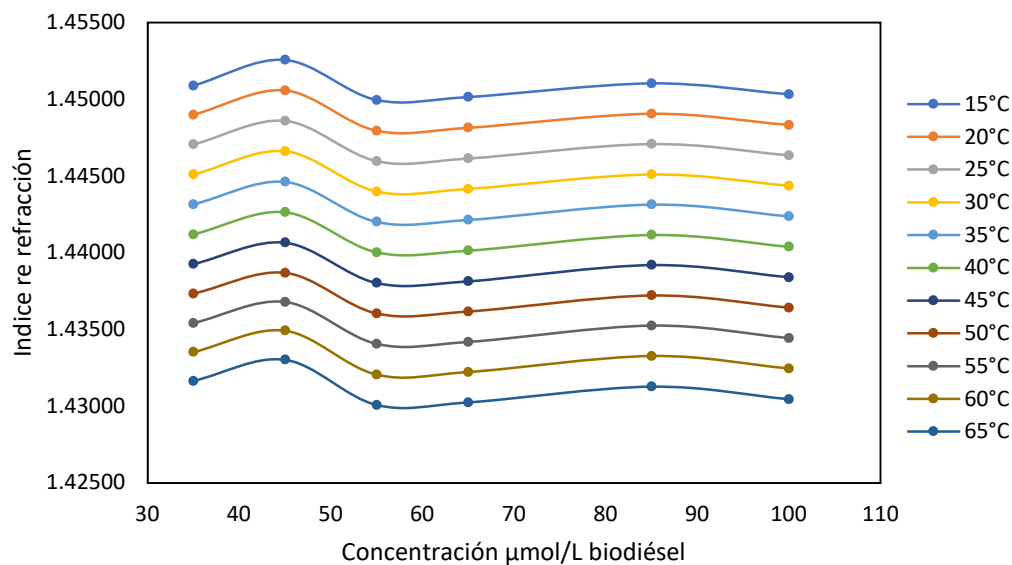


Figura 35. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MnO de 8.7 μm realizando variaciones en la concentración y la temperatura

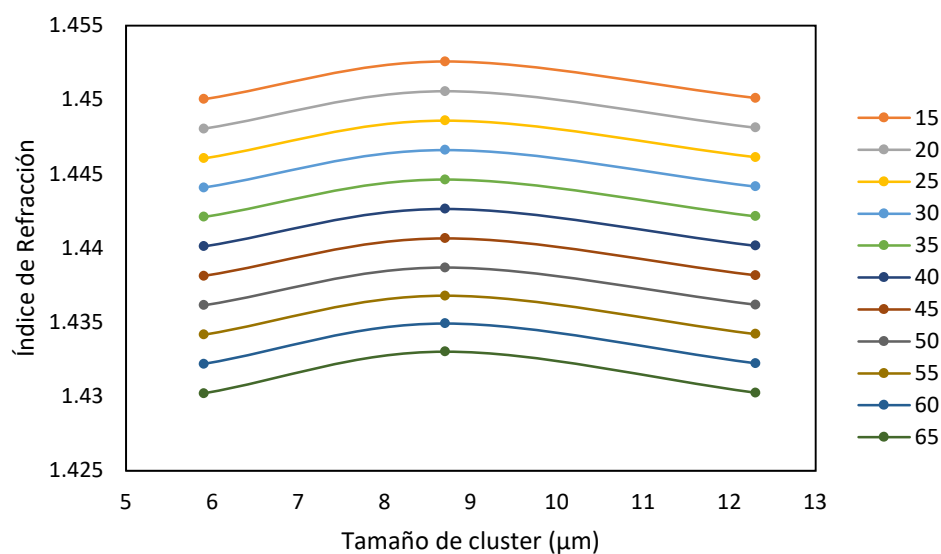


Figura 36. Índice de refracción de mezclas biodiésel-MnO a 45 $\mu\text{mol/L}$ realizando variaciones en el tamaño de cluster y la temperatura.

La Figura 36 muestra la variación del índice de refracción con respecto al tamaño de cluster de MnO a una concentración de 45 $\mu\text{mol/L}$, presentado un incremento desde 5.9 μm a 8.7 μm , seguida de una disminución de la propiedad para el tamaño de 12.9 μm .

El valor máximo del índice de refracción en la muestra de tamaño de cluster de 8.7 μm se debe a que presenta un menor espacio entre las partículas debido a su monodispersión, resultando en un mayor índice de refracción en comparación con la mezcla con un tamaño de cluster de 12.7 μm , la cual presenta polidispersión.

Valores de índice de refracción de las mezclas biodiésel + MnO fueron correlacionados utilizando el modelo teórico de la dispersión de Rayleigh con la finalidad de poder explicar el tipo de interacciones presentes en la mezcla.

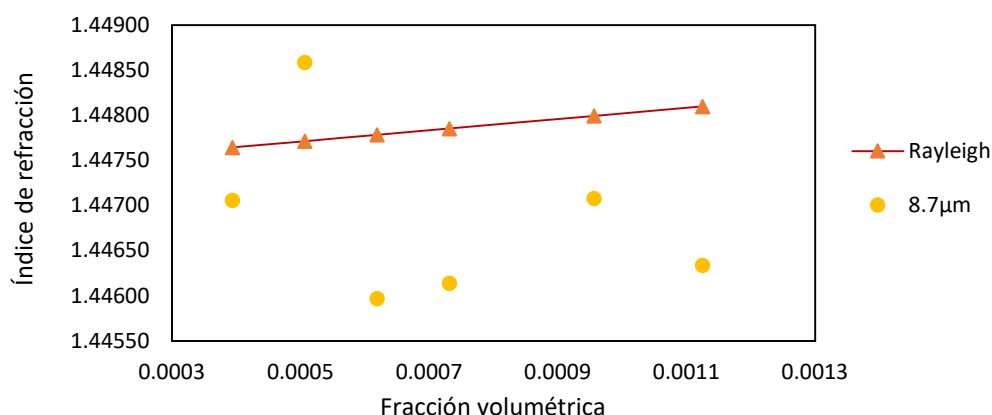


Figura 37. Comparación de los datos experimentales de índice de refracción a 25°C con el modelo de Rayleigh.

La Figura 37 muestra que los valores experimentales no se ajustan al modelo, presentando un error promedio de 0.08%, debido a que el modelo de Rayleigh no tiene en cuenta las interacciones entre partículas ni la formación de aglomerados, también asume que el tamaño de partícula tiene un valor máximo de $d < \lambda/10$. El índice de refracción fue medido usando una radiación $\lambda = 589.3$ nm, por lo que el rango de validez del modelo son tamaños menores a 59 nm. La diferencia entre el modelo teórico y los datos experimentales podría deberse a las mezclas presentan formación de aglomerados y adicionalmente los tamaños de partícula de las muestras podrían ser superiores a 59 nm.

CONCLUSIONES

- Los lodos de agua residual de la planta de noreste de agua y drenaje son una fuente de materia prima para la producción de biodiésel cumpliendo con los estándares de la norma EN 14214.
- En el proceso de producción de biodiésel a partir de grasa residual la esterificación, contribuye con un 90% de la conversión de los ácidos grasos, mientras que la esterificación solo aporta un 3 % al rendimiento total.
- En las muestras de óxido de magnesio el tamaño de cluster y el tamaño de cristal son inversamente proporcionales, la muestra con el mayor tamaño de cluster (16.1 μm) corresponde al menor tamaño de cristal (5 nm), esto indica que la aglomeración de las partículas de óxido de magnesio aumenta a medida que disminuye el tamaño de cristal.
- Para el óxido de manganeso el tamaño de cristal y el tamaño de cluster no presentan una relación definida, esto puede ser debido a que el óxido de manganeso presenta una transición de la fase cúbica Mn_2O_3 a la fase tetragonal Mn_3O_4 cuando es calcinado entre los 850 y 1050 $^{\circ}\text{C}$, a diferencia de los óxidos de magnesio que presentan una sola fase cristalina para todas las temperaturas de calcinación trabajadas.
- La densidad, la viscosidad y el índice de refracción disminuyen ante aumentos en la temperatura debido a un incremento en la energía cinética del sistema, favoreciendo una disminución de las fuerzas de cohesión y desagrupamiento entre las moléculas.
- La viscosidad de las mezclas de biodiésel-MgO mostró una desviación promedio máxima de 7.5% con respecto a la viscosidad del biodiésel puro

a 40°C, esta desviación se obtuvo para el tamaño de cluster de 9.3 μm a 65 $\mu\text{mol/L}$, mientras que para tamaños de cluster de 16.7 μm la viscosidad de la mezcla es independiente de la concentración del óxido.

- La viscosidad de las mezclas de biodiésel-MnO mostró una desviación promedio máxima de 10% respecto a la viscosidad del biodiésel puro a 45°C, esta desviación se obtuvo para el tamaño de cluster de 8.7 μm a 65 $\mu\text{mol/L}$, mientras que para tamaños de cluster de 12.7 μm la viscosidad de la mezcla es independiente de la concentración del óxido
- La densidad aumentó en todas las mezclas biodiésel-MgO, obteniéndose un incremento máximo del 0.8% a 9.3 μm y 65 $\mu\text{mol/L}$ mientras que para las mezclas biodiésel-MnO el incremento máximo fue de 0.16% a 8.7 μm y 45 $\mu\text{mol/L}$. Todos los valores de densidad se encuentran dentro del límite máximo (0.9 gr/cm^3 a 15°C) de la norma EN 14214.
- El índice de refracción en todas las mezclas biodiésel-MgO y biodiésel-MnO mostró valores semejantes al índice de refracción del biodiésel puro, para las muestras con MgO el incremento máximo fue de 0.09% para la mezcla con tamaño de cluster de 9.3 μm a 65 $\mu\text{mol/L}$, mientras que para las mezclas con MnO fue de 1.7% a un tamaño de cluster de 8.7 μm a 45 $\mu\text{mol/L}$.
- El aumento de la densidad de las mezclas biodiésel-MgO con respecto al incremento en la concentración del óxido se debe a una disminución en el volumen efectivo del biodiésel debido a la formación de nanocapas ordenadas de ésteres metílicos sobre las partículas del óxido.
- El incremento de la viscosidad de la mayoría de las mezclas se debe a que las partículas sólidas actúan como obstáculos que incrementan la resistencia al flujo de la fase líquida, provocando cambios en las líneas de

flujo debido una disipación de la energía. Adicionalmente la formación de la nanocapa de ésteres distribuidos de una manera uniforme tal que adoptan un comportamiento similar al estado sólido también contribuye al aumento de la resistencia al flujo.

- El incremento en el índice de refracción es consecuencia de los incrementos de la densidad el fluido con respecto a la concentración, adicionalmente un incremento en la cantidad de óxido suspendido genera una mayor dispersión de la luz que pasa a través de la muestra y por consiguiente un aumento en el índice de refracción.
- Las propiedades muestran un valor máximo en la mezcla biodiésel-MgO de $DH = 9.3 \mu m$, debido a la polidispersión presente. Esta distribución permite que las partículas pequeñas ocupen los espacios entre las partículas de tamaño medio y grande, aumentando la viscosidad, la densidad y el índice de refracción de las mezclas.
- Las propiedades presentan valores máximos para la mezcla biodiésel-MnO de $DH = 8.7 \mu m$, debido a que el óxido presenta monodispersión, por lo cual se distribuye de manera uniforme en el fluido disminuyendo la fracción de espacio vacío, generando incrementos en la densidad, el índice de refracción y la viscosidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Siddiquee, M. N. & Rohani, S. Lipid extraction and biodiesel production from municipal sewage sludges: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **15**, 1067–1072 (2011).
2. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, F. E., Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Stechow C, von Z. T. & Minx, J. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC* 1454 (2014) doi:10.1017/CBO9781107415416.
3. Monirul, I. M. *et al.* A comprehensive review on biodiesel cold flow properties and oxidation stability along with their improvement processes. *RSC Advances* (2015) doi:10.1039/c5ra09555g.
4. Beer, T., Grant, T., Williams, D. & Watson, H. Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles. *Atmos. Environ.* (2002) doi:10.1016/S1352-2310(01)00514-3.
5. Vargas-Ibáñez, L. T., Iglesias-Silva, G. A., Cano-Gómez, J. J., Escamilla-Alvarado, C. & Berrones-Eguiluz, M. A. Densities and Viscosities for Binary Liquid Mixtures of Biodiesel + 1-Pentanol, 2-Pentanol, or 2-Methyl-1-Butanol from (288.15 to 338.15) K at 0.1 MPa. *J. Chem. Eng. Data* **63**, 2438–2450 (2018).
6. Freitas, S. V.D. *et al.* Measurement and prediction of biodiesel surface tensions. *Energy and Fuels* (2011) doi:10.1021/ef201217q.
7. HLPE. Los biocombustibles y la seguridad alimentaria. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial. 157 (2013).
8. Mu, D., Addy, M., Anderson, E., Chen, P. & Ruan, R. A life cycle

assessment and economic analysis of the Scum-to-Biodiesel technology in wastewater treatment plants. *Bioresour. Technol.* **204**, 89–97 (2016).

9. Pokoo-Aikins, G. *et al.* A multi-criteria approach to screening alternatives for converting sewage sludge to biodiesel. *J. Loss Prev. Process Ind.* (2010) doi:10.1016/j.jlp.2010.01.005.
10. Lam, M. K., Lee, K. T. & Mohamed, A. R. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances* (2010) doi:10.1016/j.biotechadv.2010.03.002.
11. Gonzalo Callejo, A. Producción de aditivos para la mejora de propiedades de biodiésel a partir de lignina y glicerina. (Universidad de Zaragoza, 2014).
12. Ribeiro, N. *et al.* The role of additives for diesel and diesel blended (ethanol or biodiesel) fuels: A review. *Energy and Fuels* **21**, 2433–2445 (2007).
13. Saxena, V., Kumar, N. & Saxena, V. K. A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled C.I. engine. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **70**, 563–588 (2017).
14. Keskin, A., Gürü, M. & Altıparmak, D. Influence of tall oil biodiesel with Mg and Mo based fuel additives on diesel engine performance and emission. *Bioresour. Technol.* **99**, 6434–6438 (2008).
15. Jardé, E., Mansuy, L. & Faure, P. Organic markers in the lipidic fraction of sewage sludges. *Water Res.* **39**, 1215–1232 (2005).
16. Mondala, A., Liang, K., Toghiani, H., Hernandez, R. & French, T. Biodiesel production by in situ transesterification of municipal primary and secondary sludges. *Bioresour. Technol.* **100**, 1203–1210 (2009).
17. Bi, C. hao *et al.* Process development for scum to biodiesel conversion. *Bioresour. Technol.* **185**, 185–193 (2015).

18. Jain, S., Sharma, M. P. & Rajvanshi, S. Acid base catalyzed transesterification kinetics of waste cooking oil. *Fuel Process. Technol.* (2011) doi:10.1016/j.fuproc.2010.08.017.
19. Reyero, I., Arzamendi, G., Zabala, S. & Gandía, L. M. Kinetics of the NaOH-catalyzed transesterification of sunflower oil with ethanol to produce biodiesel. *Fuel Process. Technol.* (2015) doi:10.1016/j.fuproc.2014.09.008.
20. Rathore, V., Tyagi, S., Newalkar, B. & Badoni, R. P. Jatropha and Karanja oil derived DMC-biodiesel synthesis: A kinetics study. *Fuel* (2015) doi:10.1016/j.fuel.2014.10.003.
21. Shahbazi, M. R., Khoshandam, B., Nasiri, M. & Ghazvini, M. Biodiesel production via alkali-catalyzed transesterification of Malaysian RBD palm oil - Characterization, kinetics model. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* (2012) doi:10.1016/j.jtice.2012.01.009.
22. Yunus, R., Fakhru'l-Razi, A., Ooi, T. L., Biak, D. R. A. & Iyuke, S. E. Kinetics of transesterification of palm-based methyl esters with trimethylolpropane. *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.* (2004) doi:10.1007/s11746-004-0930-7.
23. Dorado, M. P., Ballesteros, E., Mittelbach, M. & López, F. J. Kinetic parameters affecting the alkali-catalyzed transesterification process of used olive oil. *Energy and Fuels* (2004) doi:10.1021/ef034088o.
24. Lu, Y., Zhang, Z., Xu, Y., Liu, Q. & Qian, G. CaFeAl mixed oxide derived heterogeneous catalysts for transesterification of soybean oil to biodiesel. *Bioresour. Technol.* (2015) doi:10.1016/j.biortech.2015.02.046.
25. Gurunathan, B. & Ravi, A. Process optimization and kinetics of biodiesel production from neem oil using copper doped zinc oxide heterogeneous nanocatalyst. *Bioresour. Technol.* (2015) doi:10.1016/j.biortech.2015.04.101.
26. Nair, P., Singh, B., Upadhyay, S. N. & Sharma, Y. C. Synthesis of biodiesel from low FFA waste frying oil using calcium oxide derived from Mereterix

- mereterix as a heterogeneous catalyst. *J. Clean. Prod.* (2012) doi:10.1016/j.jclepro.2012.01.039.
27. Kostić, M. D., Veličković, A. V., Joković, N. M., Stamenković, O. S. & Veljković, V. B. Optimization and kinetic modeling of esterification of the oil obtained from waste plum stones as a pretreatment step in biodiesel production. *Waste Manag.* (2016) doi:10.1016/j.wasman.2015.11.052.
 28. Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y. & Wang, C.-H. Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. *Energy Convers. Manag.* **123**, 487–497 (2016).
 29. Niju, S., Begum, M. M. M. S. & Anantharaman, N. Modification of egg shell and its application in biodiesel production. *J. Saudi Chem. Soc.* **18**, 702–706 (2014).
 30. Gürü, M. & Karakaya. Improvement of Diesel fuel properties by using additives. **43**, 1021–1025 (2002).
 31. Özgür, T., Özcanli, M. & Aydın, K. Investigation of nanoparticle additives to biodiesel for improvement of the performance and exhaust emissions in a compression ignition engine. in *International Journal of Green Energy* (2015). doi:10.1080/15435075.2014.889011.
 32. Çaynak, S., Gürü, M., Biçer, A., Keskin, A. & İçingür, Y. Biodiesel production from pomace oil and improvement of its properties with synthetic manganese additive. *Fuel* **88**, 534–538 (2009).
 33. Vijay Kumar, M., Veeresh Babu, A. & Ravi Kumar, P. The impacts on combustion, performance and emissions of biodiesel by using additives in direct injection diesel engine. *Alexandria Eng. J.* **57**, 509–516 (2018).
 34. Pastoriza-Gallego, M. J., Casanova, C., Legido, J. L. & Piñeiro, M. M. CuO in water nanofluid: Influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity. *Fluid Phase Equilib.* (2011)

doi:10.1016/j.fluid.2010.10.015.

35. Namburu, P. K., Kulkarni, D. P., Dandekar, A. & Das, D. K. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. *Micro Nano Lett.* (2007) doi:10.1049/mnl:20070037.
36. He, Y. *et al.* Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *Int. J. Heat Mass Transf.* (2007) doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024.
37. Bamgboye, A. I. & Hansen, A. C. Prediction of cetane number of biodiesel fuel from the fatty acid methyl ester (FAME) composition. *Int. Agrophysics* (2008).
38. Gopinath, A., Puan, S. & Nagarajan, G. Relating the cetane number of biodiesel fuels to their fatty acid composition: A critical study. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* (2009) doi:10.1243/09544070JAUTO950.
39. Boro, J., Konwar, L. J., Thakur, A. J. & Deka, D. Ba doped CaO derived from waste shells of *T. striatula* (TS-CaO) as heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Fuel* (2014) doi:10.1016/j.fuel.2014.03.067.
40. Molinder, R., Comyn, T. P., Hondow, N., Parker, J. E. & Dupont, V. In situ X-ray diffraction of CaO based CO₂ sorbents. *Energy Environ. Sci.* (2012) doi:10.1039/c2ee21779a.
41. Witton, T. Characterization of calcium oxide derived from waste eggshell and its application as CO₂ sorbent. *Ceram. Int.* **37**, 3291–3298 (2011).
42. Umdu, E. S., Tuncer, M. & Seker, E. Transesterification of *Nannochloropsis oculata* microalga's lipid to biodiesel on Al₂O₃ supported CaO and MgO catalysts. *Bioresour. Technol.* (2009) doi:10.1016/j.biortech.2008.12.027.
43. Einstein, A. Eine neue Bestimmung der XolehW-dimensionen. *Ann. Phys* **324**, 289–306 (1906).

44. Mahbubul, I. M., Saidur, R. & Amalina, M. A. Latest developments on the viscosity of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* **55**, 874–885 (2012).
45. Pal, R. Modeling the viscosity of concentrated nanoemulsions and nanosuspensions. *Fluids* (2016) doi:10.3390/fluids1020011.
46. Sharifpur, M., Yousefi, S. & Meyer, J. P. A new model for density of nanofluids including nanolayer. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* (2016) doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.010.
47. Barnes, H. A. *A Handbook of Elementary Rheology*. Science (2011). doi:10.1126/science.1201543.
48. Heyhat, M. M., Rajabpour, A., Abbasi, M. & Arabha, S. Importance of nanolayer formation in nano fluid properties: Equilibrium molecular dynamic simulations for Ag-water nano fluid. *J. Mol. Liq.* **264**, 699–705 (2018).
49. Goharshadi, E. K., Ahmadzadeh, H., Samiee, S. & Hadadian, M. Nanofluids for heat transfer enhancement-A review. *Physical Chemistry Research* (2013) doi:10.22036/pcr.2013.2791.

Anexo A

Análisis de la distribución de tamaño de partícula por DLS

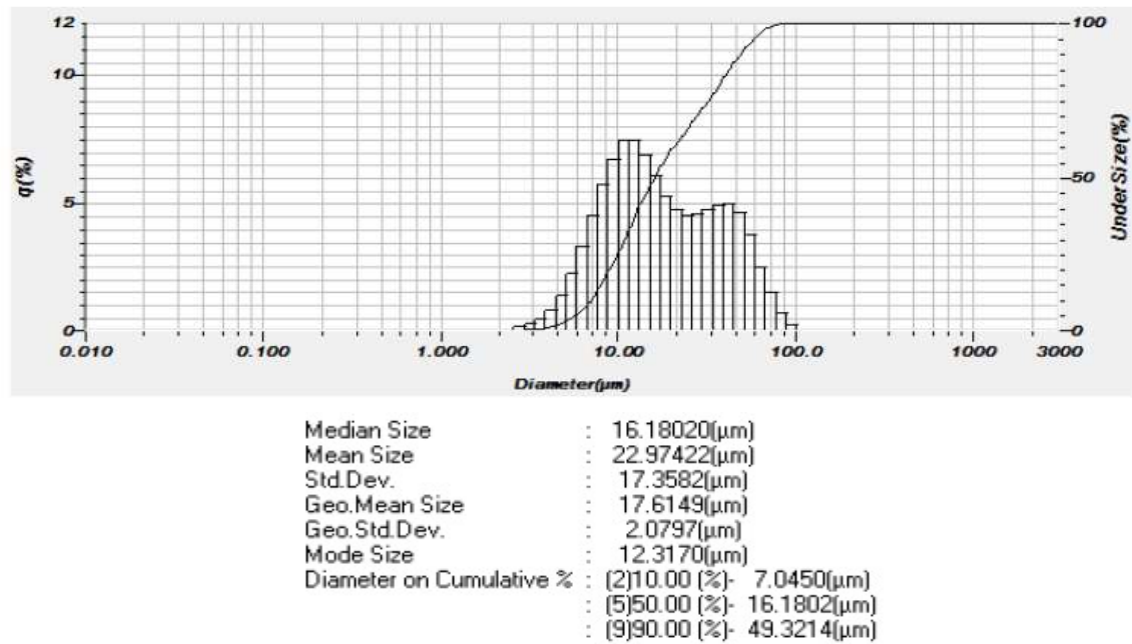


Figura A1. Distribución y tamaño de partícula de la muestra MgO Hidrotérmico 0.1 M

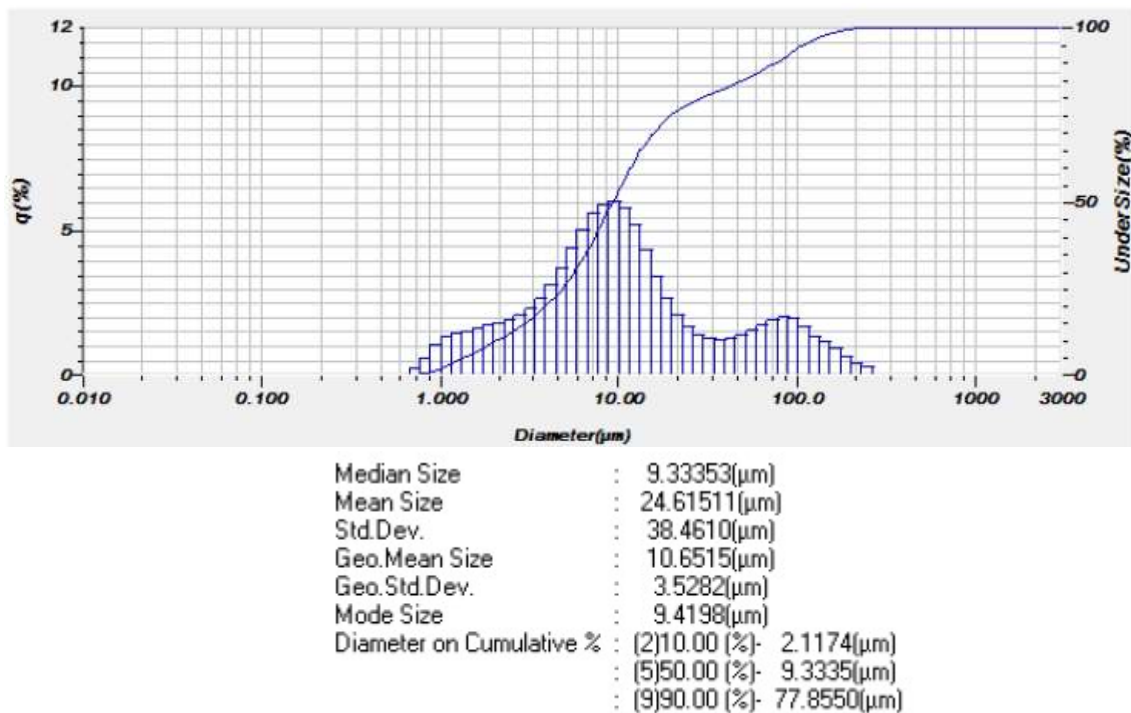
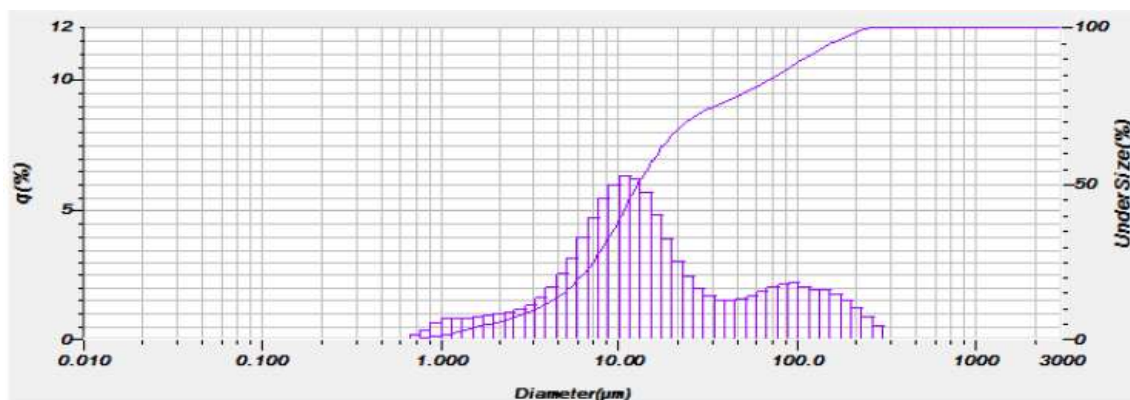
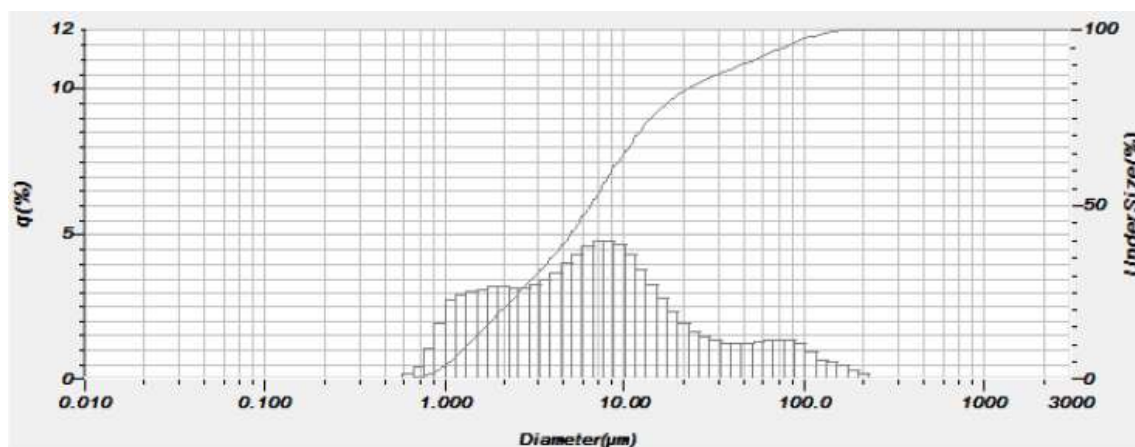


Figura A2. Distribución y tamaño de partícula para muestra MgO Térmico 500°C



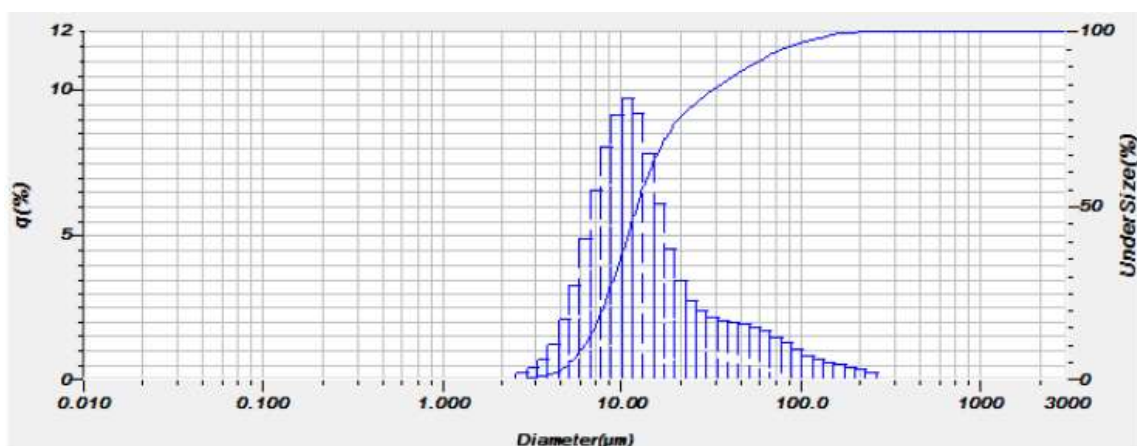
Median Size	: 12.91189(μm)
Mean Size	: 35.86156(μm)
Std.Dev.	: 52.4081(μm)
Geo.Mean Size	: 15.7632(μm)
Geo.Std.Dev.	: 3.5863(μm)
Mode Size	: 10.8323(μm)
Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 3.5395(μm)
	: (5)50.00 (%) - 12.9119(μm)
	: (9)90.00 (%) - 111.1182(μm)

Figura A3. Distribución y tamaño de partícula para muestra MgO Térmico 600°C



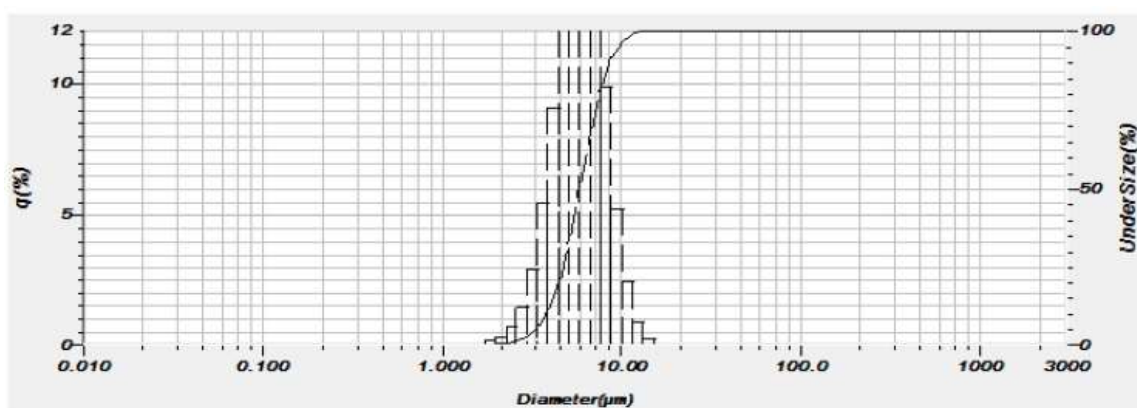
Median Size	: 6.54310(μm)
Mean Size	: 16.66079(μm)
Std.Dev.	: 28.4390(μm)
Geo.Mean Size	: 6.9958(μm)
Geo.Std.Dev.	: 3.5308(μm)
Mode Size	: 8.2229(μm)
Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 1.3802(μm)
	: (5)50.00 (%) - 6.5431(μm)
	: (9)90.00 (%) - 46.6475(μm)

Figura A4. Distribución y tamaño de partícula para muestra MgO Térmico 700°C



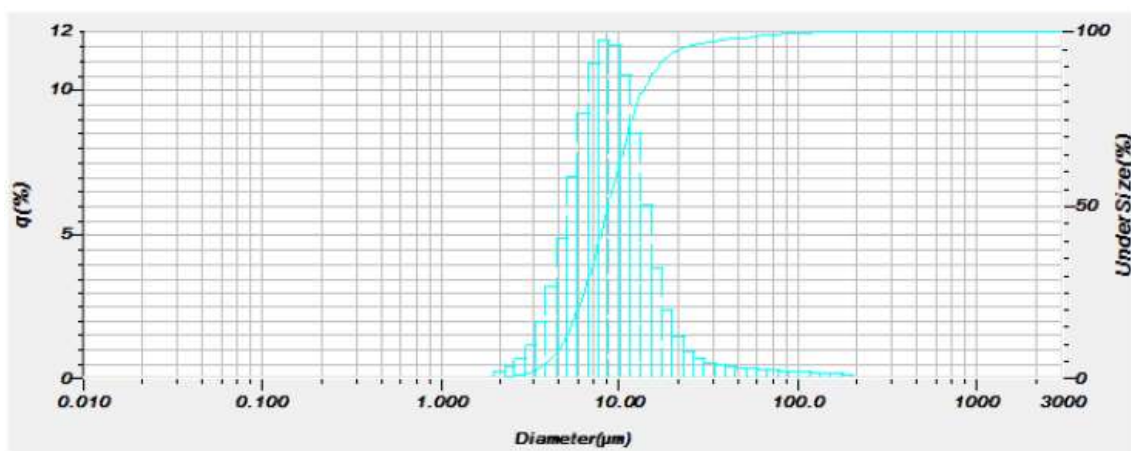
Median Size	:	12.30465(μm)
Mean Size	:	23.08888(μm)
Std.Dev.	:	30.8846(μm)
Geo.Mean Size	:	14.8861(μm)
Geo.Std.Dev.	:	2.2873(μm)
Mode Size	:	10.8097(μm)
Diameter on Cumulative %	:	(2)10.00 (%) - 6.2663(μm)
	:	(5)50.00 (%) - 12.3047(μm)
	:	(9)90.00 (%) - 53.2896(μm)

Figura A5. Distribución y tamaño de partícula para muestra MnO Térmico 850°C



Median Size	:	5.87701(μm)
Mean Size	:	6.10000(μm)
Std.Dev.	:	1.9302(μm)
Geo.Mean Size	:	5.8027(μm)
Geo.Std.Dev.	:	1.3771(μm)
Mode Size	:	6.2262(μm)
Diameter on Cumulative %	:	(2)10.00 (%) - 3.8280(μm)
	:	(5)50.00 (%) - 5.8770(μm)
	:	(9)90.00 (%) - 8.6545(μm)

Figura A6. Distribución y tamaño de partícula para muestra MnO Térmico 950°C



Median Size	:	8.72428(μm)
Mean Size	:	11.61904(μm)
Std.Dev.	:	14.5247(μm)
Geo.Mean Size	:	9.1325(μm)
Geo.Std.Dev.	:	1.7920(μm)
Mode Size	:	8.2670(μm)
Diameter on Cumulative %	:	(2)10.00 (%) - 4.8092(μm)
	:	(5)50.00 (%) - 8.7243(μm)
	:	(9)90.00 (%) - 16.6791(μm)

Figura A6. Distribución y tamaño de partícula para muestra MnO Térmico 1050°C

Anexo B

Datos experimentales de viscosidad cinemática para el sistema biodiésel-MgO

Viscosidad cinemática mm ² /s									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
K	μmol/L	5	42.2	49.7	60.7	%			
15	0	9.66989	9.66989	9.66989	9.66989	-	-	-	-
	35	9.68369	9.48886	9.86698	9.49151	0.14	-1.87	2.04	-1.84
	45	9.4715	9.8434	10.0551	9.4756	-2.05	1.79	3.98	-2.01
	55	9.6301	9.8363	9.9851	11.1028	-0.41	1.72	3.26	14.82
	65	9.8234	10.7413	11.3000	9.9370	1.59	11.08	16.86	2.76
	85	9.8145	10.1128	9.6594	9.6328	1.50	4.58	-0.11	-0.38
	100	9.8844	9.4473	9.7049	9.4446	2.22	-2.30	0.36	-2.33
20	0	8.2789	8.2789	8.2789	8.2789	-	-	-	-
	35	8.4068	8.1920	8.6902	8.1757	1.55	-1.05	4.97	-1.25
	45	8.3161	8.4264	8.6406	8.1427	0.45	1.78	4.37	-1.65
	55	8.3018	8.4853	8.5877	8.7411	0.28	2.49	3.73	5.58
	65	8.4296	9.2213	10.2535	8.6310	1.82	11.38	23.85	4.25
	85	8.4594	8.6670	8.2696	8.3917	2.18	4.69	-0.11	1.36
	100	8.4759	8.5988	8.4293	8.1008	2.38	3.86	1.82	-2.15

<i>Viscosidad cinemática mm²/s</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5	42.2	49.7	60.7	%			
25	0	7.1849	7.1849	7.1849	7.1849	-	-	-	-
	35	7.3505	7.9833	9.3895	7.3573	2.30	11.11	30.68	2.40
	45	7.2147	7.3360	7.5395	7.0907	0.41	2.10	4.94	-1.31
	55	7.2192	7.5695	7.4896	7.7162	0.48	5.35	4.24	7.39
	65	7.3505	7.9833	9.3895	7.3573	2.30	11.11	30.68	2.40
	85	7.3678	7.5575	7.2751	7.3124	2.55	5.19	1.25	1.77
	100	7.3991	7.4943	7.2747	7.0560	2.98	4.31	1.25	-1.79
30	0	6.2865	6.2865	6.2865	6.2865	-	-	-	-
	35	6.3934	6.2884	6.4873	6.2566	1.70	0.03	3.19	-0.48
	45	5.6817	5.7077	5.8521	5.5649	2.45	2.92	5.52	0.34
	55	5.0380	4.7484	5.1722	5.0104	1.82	-4.04	4.53	1.26
	65	4.5417	4.4566	4.6291	4.5014	1.82	-0.09	3.78	0.92
	85	4.1086	4.0880	4.3130	4.0816	-0.89	-1.38	4.04	-1.54
	100	3.7559	3.7267	3.9219	3.7889	-0.47	-1.25	3.93	0.40

<i>Viscosidad cinemática mm²/s</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5	42.2	49.7	60.7	%			
35	0	5.5460	5.5460	5.5460	5.5460	-	-	-	-
	35	5.6817	5.7077	5.8521	5.5649	2.45	2.92	5.52	0.34
	45	5.0380	4.7484	5.1722	5.0104	1.82	-4.04	4.53	1.26
	55	4.5417	4.4566	4.6291	4.5014	1.82	-0.09	3.78	0.92
	65	4.1086	4.0880	4.3130	4.0816	-0.89	-1.38	4.04	-1.54
	85	3.7559	3.7267	3.9219	3.7889	-0.47	-1.25	3.93	0.40
	100	3.4595	3.4288	3.5931	3.5063	1.08	0.18	4.98	2.44
40	0	4.9482	4.9482	4.9482	4.9482	-	-	-	-
	35	5.0380	4.7484	5.1722	5.0104	1.82	-4.04	4.53	1.26
	45	4.5417	4.4566	4.6291	4.5014	1.82	-0.09	3.78	0.92
	55	4.1086	4.0880	4.3130	4.0816	-0.89	-1.38	4.04	-1.54
	65	3.7559	3.7267	3.9219	3.7889	-0.47	-1.25	3.93	0.40
	85	3.4595	3.4288	3.5931	3.5063	1.08	0.18	4.98	2.44
	100	3.1778	3.2002	3.3014	3.1477	1.13	1.85	5.07	0.18

<i>Viscosidad cinemática mm²/s</i>									
Temperatura	Concentración	<i>Tamaño de cristal nm</i>				<i>Variación</i>			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>			<i>%</i>	
45	0	4.4605	4.4605	4.4605	4.4605	-	-	-	-
	35	4.5417	4.4566	4.6291	4.5014	1.82	-0.09	3.78	0.92
	45	4.5429	4.5413	4.6676	4.4495	1.85	1.81	4.64	-0.25
	55	4.4573	4.5965	4.7477	4.8526	-0.07	3.05	6.44	8.79
	65	4.4215	4.9466	5.7586	4.6507	-0.88	10.90	29.10	4.26
	85	4.6338	4.5893	4.5432	4.3981	3.88	2.89	1.85	-1.40
	100	4.4762	4.6970	4.6254	4.2293	0.35	5.30	3.70	-5.18
50	0	4.1454	4.1454	4.1454	4.1454	-	-	-	-
	35	4.1086	4.0880	4.3130	4.0816	-0.89	-1.38	4.04	-1.54
	45	4.1014	4.1256	4.1997	4.0437	-1.06	-0.48	1.31	-2.45
	55	4.0781	4.1630	4.2598	4.3646	-1.62	0.43	2.76	5.29
	65	4.0000	4.4376	5.0979	4.2169	-3.51	7.05	22.98	1.73
	85	4.1858	4.1704	4.1478	3.9876	0.98	0.60	0.06	-3.81
	100	4.0568	4.2272	4.2102	3.8388	-2.14	1.97	1.56	-7.40

<i>Viscosidad cinemática mm²/s</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
55	0	3.7738	3.7738	3.7738	3.7738	-	-	-	-
	35	3.7559	3.7267	3.9219	3.7889	-0.47	-1.25	3.93	0.40
	45	3.7598	3.7686	3.7949	3.6386	-0.37	-0.14	0.56	-3.58
	55	3.7317	3.7870	3.8849	4.0343	-1.12	0.35	2.95	6.90
	65	3.8245	4.0485	4.7004	3.8533	1.34	7.28	24.55	2.11
	85	3.8250	3.7610	3.7661	3.5992	1.36	-0.34	-0.20	-4.62
	100	3.6906	3.8981	3.8268	3.5013	-2.20	3.30	1.41	-7.22
60	0	3.4227	3.4227	3.4227	3.4227	-	-	-	-
	35	3.4595	3.4288	3.5931	3.5063	1.08	0.18	4.98	2.44
	45	3.4557	3.4252	3.4106	3.3207	0.96	0.07	-0.35	-2.98
	55	3.3893	3.4625	3.5650	3.7249	-0.97	1.16	4.16	8.83
	65	3.4748	3.6903	4.3551	3.5225	1.52	7.82	27.24	2.91
	85	3.4942	3.5006	3.4380	3.3684	2.09	2.28	0.45	-1.59
	100	3.3792	3.5655	3.5129	3.1897	-1.27	4.17	2.64	-6.81

<i>Viscosidad cinemática mm²/s</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>			<i>%</i>	
65	0	3.1421	3.1421	3.1421	3.1421	-	-	-	-
	35	3.1778	3.2002	3.3014	3.1477	1.13	1.85	5.07	0.18
	45	3.2410	3.1498	3.2274	3.0623	3.15	0.24	2.71	-2.54
	55	3.1170	3.1833	3.2812	3.5557	-0.80	1.31	4.43	13.16
	65	3.2266	3.4199	3.8871	3.2252	2.69	8.84	23.71	2.64
	85	3.2351	3.2236	3.1468	3.0795	2.96	2.59	0.15	-1.99
	100	3.1075	3.2730	3.2190	2.9377	-1.10	4.17	2.45	-6.51

Anexo C

Datos experimentales de densidad para el sistema biodiésel-MgO

Densidad gr/cm ³									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
K	μmol/L	5	42.2	49.7	60.7	%			
15	0	0.87635	0.87635	0.87635	0.87635	-	-	-	-
	35	0.87721	0.87722	0.87308	0.87721	0.0981	0.0993	0.0434	0.0981
	45	0.8765	0.87669	0.87359	0.8765	0.0171	0.0388	0.1004	0.0171
	55	0.87742	0.87739	0.87382	0.87742	0.1221	0.1187	0.1267	0.1221
	65	0.87728	0.87765	0.8802	0.87728	0.1061	0.1483	0.8558	0.1061
	85	0.87765	0.87771	0.87277	0.87765	0.1483	0.1552	0.0114	0.1483
	100	0.87765	0.87782	0.87401	0.87765	0.1483	0.1677	0.1495	0.1483
20	0	0.87264	0.87264	0.87264	0.87264	-	-	-	-
	35	0.87357	0.87358	0.87308	0.87357	0.1066	0.1077	0.0504	0.1066
	45	0.87282	0.87303	0.87359	0.87282	0.0206	0.0447	0.1089	0.0206
	55	0.87378	0.87375	0.87382	0.87378	0.1306	0.1272	0.1352	0.1306
	65	0.87364	0.87401	0.8802	0.87364	0.1146	0.1570	0.8663	0.1146
	85	0.874	0.87406	0.87277	0.874	0.1558	0.1627	0.0149	0.1558
	100	0.87401	0.87417	0.87401	0.87401	0.1570	0.1753	0.1570	0.1570

<i>Densidad gr/cm³</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
25	0	0.86899	0.86899	0.86899	0.86899	-	-	-	-
	35	0.86992	0.86993	0.86941	0.86992	0.1070	0.1082	0.0483	0.1070
	45	0.86914	0.86937	0.86994	0.86914	0.0173	0.0437	0.1093	0.0173
	55	0.87013	0.87011	0.87017	0.87013	0.1312	0.1289	0.1358	0.1312
	65	0.86999	0.87037	0.87654	0.86999	0.1151	0.1588	0.8688	0.1151
	85	0.87036	0.8704	0.86909	0.87036	0.1577	0.1623	0.0115	0.1577
	100	0.87036	0.87052	0.87036	0.87036	0.1577	0.1761	0.1577	0.1577
30	0	0.86534	0.86534	0.86534	0.86534	-	-	-	-
	35	0.86628	0.86629	0.86575	0.86628	0.1086	0.1098	0.0474	0.1086
	45	0.86547	0.86571	0.86631	0.86547	0.0150	0.0428	0.1121	0.0150
	55	0.86649	0.86647	0.86653	0.86649	0.1329	0.1306	0.1375	0.1329
	65	0.86635	0.86673	0.87289	0.86635	0.1167	0.1606	0.8725	0.1167
	85	0.86672	0.86676	0.86541	0.86672	0.1595	0.1641	0.0081	0.1595
	100	0.86672	0.86687	0.86671	0.86672	0.1595	0.1768	0.1583	0.1595

<i>Densidad gr/cm³</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
35	0	0.86170	0.86170	0.86170	0.86170	-	-	-	-
	35	0.86264	0.86266	0.86209	0.86264	0.1091	0.1114	0.0453	0.1091
	45	0.8618	0.86206	0.86267	0.8618	0.0116	0.0418	0.1126	0.0116
	55	0.86245	0.86284	0.8629	0.86245	0.0870	0.1323	0.1393	0.0870
	65	0.86271	0.86309	0.86924	0.86271	0.1172	0.1613	0.8750	0.1172
	85	0.86308	0.86311	0.86174	0.86308	0.1601	0.1636	0.0046	0.1601
	100	0.86308	0.86323	0.86306	0.86308	0.1601	0.1776	0.1578	0.1601
40	0	0.85806	0.85806	0.85806	0.85806	-	-	-	-
	35	0.85901	0.85903	0.85844	0.85901	0.1107	0.1130	0.044	0.1107
	45	0.85813	0.85841	0.85904	0.85813	0.0082	0.0408	0.114	0.0082
	55	0.85922	0.85921	0.85927	0.85922	0.1352	0.1340	0.141	0.1352
	65	0.85908	0.85946	0.8656	0.85908	0.1189	0.1632	0.879	0.1189
	85	0.85945	0.85947	0.85807	0.85945	0.1620	0.1643	0.001	0.1620
	100	0.85944	0.85959	0.85942	0.85944	0.1608	0.1783	0.158	0.1608

<i>Densidad gr/cm³</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5	42.2	49.7	60.7	%			
45	0	0.85442	0.85442	0.85442	0.85442	-	-	-	-
	35	0.85538	0.8554	0.85479	0.85538	0.1124	0.1147	0.0433	0.1124
	45	0.85447	0.85477	0.85541	0.85447	0.0059	0.0410	0.1159	0.0059
	55	0.8556	0.85558	0.85564	0.8556	0.1381	0.1358	0.1428	0.1381
	65	0.85545	0.85584	0.86195	0.85545	0.1205	0.1662	0.8813	0.1205
	85	0.85582	0.85583	0.8546	0.85582	0.1639	0.1650	0.0211	0.1639
	100	0.85581	0.85596	0.85578	0.85581	0.1627	0.1802	0.1592	0.1627
50	0	0.85108	0.85108	0.85108	0.85108	-	-	-	-
	35	0.85175	0.85177	0.85113	0.85175	0.0787	0.0811	0.0059	0.0787
	45	0.85118	0.85112	0.85179	0.85118	0.0117	0.0047	0.0834	0.0117
	55	0.85197	0.85195	0.85202	0.85197	0.1046	0.1022	0.1104	0.1046
	65	0.85182	0.85221	0.85832	0.85182	0.0869	0.1328	0.8507	0.0869
	85	0.85219	0.85219	0.85173	0.85219	0.1304	0.1304	0.0764	0.1304
	100	0.85218	0.85232	0.85214	0.85218	0.1292	0.1457	0.1245	0.1292

<i>Densidad gr/cm³</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
55	0	0.84715	0.84715	0.84715	0.84715	-	-	-	-
	35	0.84813	0.84814	0.84748	0.84813	0.1157	0.1169	0.0390	0.1157
	45	0.84733	0.84748	0.84816	0.84733	0.0212	0.0390	0.1192	0.0212
	55	0.84835	0.84833	0.8484	0.84835	0.1417	0.1393	0.1476	0.1417
	65	0.8482	0.84858	0.85468	0.8482	0.1239	0.1688	0.8889	0.1239
	85	0.84856	0.84856	0.84737	0.84856	0.1664	0.1664	0.0260	0.1664
	100	0.84855	0.84869	0.8485	0.84855	0.1653	0.1818	0.1594	0.1653
60	0	0.84351	0.84351	0.84351	0.84351	-	-	-	-
	35	0.84461	0.84452	0.84383	0.84461	0.1304	0.1197	0.0379	0.1304
	45	0.84377	0.84386	0.84454	0.84377	0.0308	0.0415	0.1221	0.0308
	55	0.84473	0.8447	0.84478	0.84473	0.1446	0.1411	0.1506	0.1446
	65	0.84457	0.84496	0.85103	0.84457	0.1257	0.1719	0.8915	0.1257
	85	0.84494	0.84492	0.84373	0.84494	0.1695	0.1672	0.0261	0.1695
	100	0.84492	0.84505	0.84487	0.84492	0.1672	0.1826	0.1612	0.1672

<i>Densidad gr/cm³</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5	42.2	49.7	60.7	%			
65	0	0.83991	0.83991	0.83991	0.83991	-	-	-	-
	35	0.84088	0.84089	0.84018	0.84088	0.1155	0.1167	0.0434	0.1155
	45	0.83999	0.84019	0.84092	0.83999	0.0095	0.0333	0.1004	0.0095
	55	0.8411	0.84108	0.84115	0.8411	0.1417	0.1393	0.1267	0.1417
	65	0.84095	0.84133	0.84739	0.84095	0.1238	0.1691	0.8558	0.1238
	85	0.84131	0.84129	0.83993	0.84131	0.1667	0.1643	0.0114	0.1667
	100	0.84129	0.84142	0.84123	0.84129	0.1643	0.1798	0.1495	0.1643

Anexo D

Datos experimentales de índice de refracción para el sistema biodiésel-MgO

Índice de Refracción									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
K	$\mu\text{mol/L}$	5	42.2	49.7	60.7			%	
15	0	1.45087	1.45087	1.45087	1.45087	-	-	-	-
	35	1.45128	1.45123	1.45126	1.45127	0.0283	0.0248	0.0269	0.0276
	45	1.45123	1.45122	1.4513	1.45125	0.0248	0.0241	0.0296	0.0262
	55	1.45055	1.45127	1.45106	1.45093	0.0221	0.0276	0.0131	0.0041
	65	1.45103	1.45136	1.45209	1.45125	0.0110	0.0338	0.0841	0.0262
	85	1.45125	1.45111	1.4512	1.45118	0.0262	0.0165	0.0227	0.0214
	100	1.45114	1.45109	1.45126	1.45194	0.0186	0.0152	0.0152	0.0737
20	0	1.44888	1.44888	1.44888	1.44888	-	-	-	-
	35	1.4493	1.44923	1.44928	1.44928	0.0290	0.0242	0.0276	0.0276
	45	1.44924	1.44926	1.44931	1.44925	0.0248	0.0262	0.0297	0.0255
	55	1.44857	1.44928	1.44906	1.44892	0.0214	0.0276	0.0124	0.0028
	65	1.449	1.44937	1.4501	1.44927	0.0083	0.0338	0.0842	0.0269
	85	1.44925	1.44909	1.44921	1.44919	0.0255	0.0145	0.0228	0.0214
	100	1.44912	1.44909	1.44928	1.44981	0.0166	0.0145	0.0145	0.0642

<i>Índice de refracción</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
25	0	1.44690	1.44690	1.44690	1.44690	-	-	-	-
	35	1.4473	1.44723	1.44729	1.44728	0.0276	0.0228	0.0290	0.0263
	45	1.44724	1.44726	1.44732	1.4472	0.0235	0.0249	0.0117	0.0207
	55	1.44691	1.4473	1.44707	1.44693	0.0007	0.0276	0.0843	0.0021
	65	1.44699	1.44738	1.44812	1.44728	0.0062	0.0332	0.0207	0.0263
	85	1.44724	1.44708	1.4472	1.44719	0.0235	0.0124	0.0131	0.0200
	100	1.44711	1.44709	1.44729	1.44751	0.0145	0.0131	0.0270	0.0422
30	0	1.44491	1.44491	1.44491	1.44491	-	-	-	-
	35	1.44532	1.44524	1.44533	1.44531	0.0284	0.0228	0.0291	0.0277
	45	1.44525	1.44525	1.44535	1.44514	0.0235	0.0235	0.0305	0.0159
	55	1.4443	1.44533	1.44507	1.44494	0.0422	0.0291	0.0111	0.0021
	65	1.44493	1.4454	1.44614	1.44531	0.0014	0.0339	0.0851	0.0277
	85	1.44521	1.44509	1.44519	1.44521	0.0208	0.0125	0.0194	0.0208
	100	1.44506	1.44509	1.44533	1.44672	0.0104	0.0125	0.0125	0.1253

<i>Índice de refracción</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
35	0	1.44291	1.44291	1.44291	1.44291	-	-	-	-
	35	1.44333	1.44325	1.44335	1.44333	0.0291	0.0236	0.0305	0.0291
	45	1.44324	1.44324	1.44337	1.44317	0.0229	0.0229	0.0319	0.0180
	55	1.44206	1.44335	1.44309	1.44295	0.0589	0.0305	0.0125	0.0028
	65	1.44288	1.44342	1.44416	1.44333	0.0021	0.0353	0.0866	0.0291
	85	1.44318	1.44308	1.44317	1.44322	0.0187	0.0118	0.0180	0.0215
	100	1.443	1.44304	1.44335	1.44513	0.0062	0.0090	0.0090	0.1539
40	0	1.44492	1.44492	1.44492	1.44492	-	-	-	-
	35	1.44134	1.44325	1.44137	1.44135	0.0291	0.0250	0.0312	0.0298
	45	1.44123	1.44324	1.44138	1.44119	0.0215	0.0229	0.0319	0.0187
	55	1.43987	1.44335	1.44108	1.44096	0.0729	0.0312	0.0111	0.0028
	65	1.44085	1.44342	1.44217	1.44136	0.0049	0.0368	0.0868	0.0305
	85	1.44114	1.44308	1.44114	1.44122	0.0153	0.0090	0.0153	0.0208
	100	1.44094	1.44304	1.44137	1.44323	0.0014	0.0049	0.0049	0.1603

<i>Índice de refracción</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
45	0	1.43893	1.43893	1.43893	1.43893	-	-	0.0270	-
	35	1.43934	1.4393	1.43938	1.43936	0.0285	0.0257	0.0290	0.0299
	45	1.43925	1.43926	1.43939	1.4392	0.0222	0.0229	0.0117	0.0188
	55	1.43778	1.43939	1.43909	1.43897	0.0799	0.0320	0.0843	0.0028
	65	1.4388	1.43946	1.44019	1.43937	0.0090	0.0368	0.0207	0.0306
	85	1.43911	1.43902	1.43913	1.43923	0.0125	0.0063	0.0131	0.0208
	100	1.43887	1.43898	1.43938	1.4412	0.0042	0.0035	0.0270	0.1578
50	0	1.43695	1.43695	1.43695	1.43695	-	-	-	-
	35	1.43735	1.43731	1.4374	1.43737	0.0278	0.0251	0.0313	0.0292
	45	1.43725	1.43726	1.43741	1.43721	0.0209	0.0216	0.0320	0.0181
	55	1.43577	1.43741	1.43709	1.43698	0.0821	0.0320	0.0097	0.0021
	65	1.43676	1.43748	1.43821	1.43739	0.0132	0.0369	0.0877	0.0306
	85	1.43707	1.43698	1.43709	1.43722	0.0084	0.0021	0.0097	0.0188
	100	1.43681	1.43696	1.4374	1.4391	0.0097	0.0007	0.0007	0.1496

<i>Índice de refracción</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>	<i>%</i>			
55	0	1.44690	1.44690	1.44690	1.44690	-	-	-	-
	35	1.43536	1.43533	1.44729	1.43539	0.0272	0.0251	0.0307	0.0293
	45	1.43526	1.43528	1.44732	1.43526	0.0202	0.0216	0.0314	0.0202
	55	1.43378	1.43542	1.44707	1.43498	0.0829	0.0314	0.0091	0.0007
	65	1.43472	1.43549	1.44812	1.4354	0.0174	0.0362	0.0878	0.0300
	85	1.43504	1.43501	1.4472	1.43523	0.0049	0.0028	0.0711	0.0181
	100	1.43475	1.43492	1.44729	1.43696	0.0153	0.0049	0.0007	0.1387
60	0	1.43497	1.43497	1.43497	1.43497	-	-	-	-
	35	1.43335	1.43332	1.43541	1.4334	0.0258	0.0237	0.0307	0.0293
	45	1.43326	1.43328	1.43542	1.43328	0.0195	0.0209	0.0314	0.0209
	55	1.43181	1.43344	1.4351	1.433	0.0816	0.0321	0.0091	0.0014
	65	1.43269	1.43352	1.43623	1.43342	0.0202	0.0377	0.0879	0.0307
	85	1.43301	1.433	1.43507	1.43322	0.0021	0.0014	0.0035	0.0167
	100	1.4327	1.43291	1.43541	1.43483	0.0195	0.0028	0.0007	0.1291

<i>Índice de refracción</i>									
Temperatura	Concentración	Tamaño de cristal nm				Variación			
<i>K</i>	<i>μmol/L</i>	<i>5</i>	<i>42.2</i>	<i>49.7</i>	<i>60.7</i>			<i>%</i>	
65	0	1.43097	1.43097	1.43097	1.43097	-	-	-	-
	35		1.43136	1.44729	1.4314		0.0273	0.0314	0.0300
	45		1.43128	1.44732	1.4313		0.0217	0.0314	0.0231
	55		1.43145	1.44707	1.431		0.0335	0.0098	0.0021
	65		1.43152	1.44812	1.43143		0.0384	0.0894	0.0321
	85		1.43105	1.4472	1.4312		0.0056	0.0007	0.0161
	100		1.43087	1.44729	1.43268		0.0056	0.0007	0.1195

ANEXO E

Datos experimentales de viscosidad cinemática para el sistema biodiésel-MnO

Viscosidad cinemática mm ² /s							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5.9	8.7	12.7	%		
15	0	9.66989	9.66989	9.66989	-	-	-
	35	9.0786	9.8209	9.9396	-6.11	1.56	2.79
	45	9.8490	9.4756	10.0551	1.85	3.98	-2.01
	55	10.7787	10.1394	9.9851	11.47	4.86	3.26
	65	10.8022	11.3000	10.5098	11.71	16.86	8.69
	85	10.3851	12.6728	9.6594	7.40	-0.11	31.05
	100	11.3201	10.7390	9.7049	17.07	0.36	11.06
25	0	7.1849	7.1849	7.1849	-	-	-
	35	6.7898	7.3539	7.3935	-5.50	2.35	2.90
	45	7.3366	7.0907	7.5395	2.11	4.94	-1.31
	55	8.0444	7.5749	7.4896	11.96	5.43	4.24
	65	9.0878	9.3895	7.7149	26.48	30.68	7.38
	85	7.7205	9.2016	7.2751	7.45	1.25	28.07
	100	7.9650	7.7777	7.2747	10.86	1.25	8.25

<i>Viscosidad cinemática mm²/s</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5.9	8.7	12.7	%		
35	0	5.5460	5.5460	5.5460	-	-	-
	35	5.7251	5.7134	5.9547	3.23	3.02	7.37
	45	5.6489	5.5627	5.8521	1.86	5.52	0.30
	55	6.2355	5.9308	5.8207	12.43	6.94	4.95
	65	6.6977	7.2787	5.9505	20.77	31.24	7.29
	85	6.0089	7.0225	5.5984	8.35	0.94	26.62
	100	6.1474	6.1272	5.6558	10.84	1.98	10.48
45	0	4.4605	4.4605	4.4605	-	-	-
	35	4.7040	4.6098	4.6221	5.46	3.35	3.62
	45	4.2039	4.4495	4.6676	-5.75	4.64	-0.25
	55	5.1229	4.7295	4.7477	14.85	6.03	6.44
	65	5.2948	5.7586	4.6502	18.70	29.10	4.25
	85	4.8477	5.4496	4.5432	8.68	1.85	22.17
	100	4.9071	4.8164	4.6254	10.01	3.70	7.98

Viscosidad cinemática mm²/s							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
K	μmol/L		5.9	8.7	12.7	%	
55	0	3.7738	3.7738	3.7738	-	-	-
	35	3.8038	3.8990	3.8953	0.80	3.32	3.22
	45	3.4881	3.6386	3.7949	-7.57	0.56	-3.58
	55	4.2349	3.9120	3.8849	12.22	3.66	2.95
	65	4.3928	4.7004	3.7920	16.40	24.55	0.48
	85	3.7698	4.4097	3.7661	-0.11	-0.20	16.85
	100	4.0066	3.8662	3.8268	6.17	1.41	2.45
65	0	3.4227	3.4227	3.4227	-	-	-
	35	2.9224	3.2110	3.2158	-6.99	2.19	2.34
	45	2.9150	3.0623	3.2274	-7.23	2.71	-2.54
	55	3.3996	3.3038	3.2812	8.19	5.14	4.43
	65	3.6915	3.8871	3.1641	17.49	23.71	0.70
	85	3.2998	3.6201	3.1468	5.02	0.15	15.21
	100	3.4225	3.2171	3.2190	8.92	2.45	2.39

ANEXO F

Datos experimentales densidad para el sistema biodiésel-MnO

<i>Densidad gr/cm³</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5.9	8.7	12.7	%		
15	0	0.87635	0.87635	0.87635	-	-	-
	35	0.87704	0.87761	0.87694	0.08	0.14	0.07
	45	0.88322	0.89316	0.87723	0.78	1.92	0.10
	55	0.88134	0.87756	0.87758	0.57	0.14	0.14
	65	0.88637	0.87764	0.87777	1.14	0.15	0.16
	85	0.87817	0.88661	0.87761	0.21	1.17	0.14
	100	0.87813	0.87903	0.88611	0.20	0.31	1.11
20	0	0.87264	0.87264	0.87264	-	-	-
	35	0.87339	0.87397	0.87329	0.09	0.15	0.07
	45	0.87955	0.88869	0.87357	0.79	1.84	0.11
	55	0.8777	0.87392	0.87393	0.58	0.15	0.15
	65	0.88272	0.87399	0.87413	1.16	0.15	0.17
	85	0.87451	0.88294	0.87394	0.21	1.18	0.15
	100	0.87447	0.87537	0.88244	0.21	0.31	1.12

<i>Densidad gr/cm³</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
25	0	0.86899	0.86899	0.86899	-	-	-
	35	0.86973	0.87033	0.86962	0.09	0.15	0.07
	45	0.87588	0.88501	0.86991	0.79	1.84	0.11
	55	0.87407	0.87028	0.87028	0.58	0.15	0.15
	65	0.87906	0.87033	0.87049	1.16	0.15	0.17
	85	0.87084	0.87925	0.87025	0.21	1.18	0.14
	100	0.87081	0.8717	0.87876	0.21	0.31	1.12
30	0	0.86534	0.86534	0.86534	-	-	-
	35	0.86608	0.86669	0.86597	0.09	0.16	0.07
	45	0.87221	0.88133	0.86626	0.79	1.85	0.11
	55	0.8704	0.86664	0.86664	0.58	0.15	0.15
	65	0.8754	0.86667	0.86685	1.16	0.15	0.17
	85	0.86718	0.87558	0.86657	0.21	1.18	0.14
	100	0.86715	0.86804	0.87509	0.21	0.31	1.13

<i>Densidad gr/cm³</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
35	0	0.8617	0.8617	0.8617	-	-	-
	35	0.86243	0.86305	0.86232	0.08	0.16	0.07
	45	0.86854	0.87765	0.8626	0.79	1.85	0.10
	55	0.86675	0.863	0.863	0.59	0.15	0.15
	65	0.87175	0.86302	0.86322	1.17	0.15	0.18
	85	0.86353	0.8719	0.86289	0.21	1.18	0.14
	100	0.8635	0.86438	0.87141	0.21	0.31	1.13
40	0	0.85806	0.85806	0.85806	-	-	-
	35	0.85878	0.85942	0.85867	0.08	0.16	0.07
	45	0.86487	0.87396	0.85896	0.79	1.85	0.10
	55	0.86311	0.85937	0.85936	0.59	0.15	0.15
	65	0.8681	0.85938	0.85959	1.17	0.15	0.18
	85	0.85987	0.86823	0.85921	0.21	1.19	0.13
	100	0.85985	0.86073	0.86774	0.21	0.31	1.13

<i>Densidad gr/cm³</i>							
Temperatura	Concentración	<i>Tamaño de cluster μm</i>			<i>Variación</i>		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
45	0	0.85442	0.85442	0.85442	-	-	-
	35	0.85514	0.85579	0.85503	0.08	0.16	0.07
	45	0.86121	0.87028	0.85532	0.79	1.86	0.11
	55	0.85947	0.85575	0.85573	0.59	0.16	0.15
	65	0.86445	0.85574	0.85596	1.17	0.15	0.18
	85	0.85622	0.86456	0.85554	0.21	1.19	0.13
	100	0.85621	0.85709	0.86408	0.21	0.31	1.13
50	0	0.85108	0.85108	0.85108	-	-	-
	35	0.8515	0.85217	0.85139	0.05	0.13	0.04
	45	0.85755	0.86659	0.85168	0.76	1.82	0.07
	55	0.85583	0.85212	0.8521	0.56	0.12	0.12
	65	0.86079	0.8521	0.85234	1.14	0.12	0.15
	85	0.85257	0.86088	0.85187	0.18	1.15	0.09
	100	0.85257	0.85344	0.86041	0.18	0.28	1.10

<i>Densidad gr/cm³</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
55	0	0.84715	0.84715	0.84715	-	-	-
	35	0.84786	0.84855	0.84774	0.08	0.17	0.07
	45	0.85389	0.8629	0.84804	0.80	1.86	0.11
	55	0.85219	0.84849	0.84847	0.59	0.16	0.16
	65	0.85714	0.84846	0.84872	1.18	0.15	0.19
	85	0.84893	0.85721	0.84819	0.21	1.19	0.12
	100	0.84893	0.84979	0.85674	0.21	0.31	1.13
60	0	0.84351	0.84351	0.84351	-	-	-
	35	0.84422	0.84492	0.8441	0.08	0.17	0.07
	45	0.85022	0.85921	0.8444	0.80	1.86	0.11
	55	0.84855	0.84487	0.84485	0.60	0.16	0.16
	65	0.85348	0.84481	0.8451	1.18	0.15	0.19
	85	0.84528	0.85353	0.844452	0.21	1.19	0.11
	100	0.84529	0.84614	0.85306	0.21	0.31	1.13

<i>Densidad gr/cm³</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
65	0	0.83991	0.83991	0.83991	-	-	-
	35	0.84058	0.8413	0.84086	0.08	0.17	0.11
	45	0.84656	0.85552	0.84075	0.79	1.86	0.10
	55	0.84491	0.84124	0.84122	0.60	0.16	0.16
	65	0.84983	0.84117	0.84147	1.18	0.15	0.19
	85	0.84164	0.84985	0.84085	0.21	1.18	0.11
	100	0.84165	0.84249	0.84939	0.21	0.31	1.13

ANEXO G

Datos experimentales de índice de refracción para el sistema biodiésel-MnO

<i>índice de refracción</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5.9	8.7	12.7	%		
15	0	1.45006	1.45006	1.45006	-	-	-
	35	0.87704	0.87761	0.87694	0.08	0.06	0.04
	45	0.88322	0.89316	0.87723	0.00	0.17	0.00
	55	0.88134	0.87756	0.87758	0.11	-0.01	0.09
	65	0.88637	0.87764	0.87777	0.14	0.01	0.09
	85	0.87817	0.88661	0.87761	0.01	0.07	-0.01
	100	0.87813	0.87903	0.88611	0.00	0.02	0.00
20	0	1.44805	1.44805	1.44805	-	-	-
	35	1.44926	1.44899	1.44869	0.08	0.06	0.04
	45	1.44804	1.45057	1.44812	0.00	0.17	0.00
	55	1.44965	1.44795	1.44931	0.11	-0.01	0.09
	65	1.45014	1.44814	1.44938	0.14	0.01	0.09
	85	1.44815	1.44905	1.44796	0.01	0.07	-0.01
	100	1.44804	1.44832	1.44798	0.00	0.02	0.00

<i>índice de refracción</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	5.9	8.7	12.7	%		
25	0	1.44606	1.44606	1.44606	-	-	-
	35	1.44725	1.44706	1.44674	0.08	0.07	0.05
	45	1.44605	1.44859	1.44612	0.00	0.17	0.00
	55	1.44768	1.44597	1.44732	0.11	-0.01	0.09
	65	1.44816	1.44614	1.44739	0.15	0.01	0.09
	85	1.44616	1.44708	1.44595	0.01	0.07	-0.01
	100	1.44604	1.44634	1.44595	0.00	0.02	-0.01
30	0	1.44408	1.44408	1.44408	-	-	-
	35	1.44526	1.44510	1.44479	0.08	0.07	0.05
	45	1.44408	1.44661	1.44415	0.00	0.18	0.00
	55	1.4457	1.44399	1.44534	0.11	-0.01	0.09
	65	1.44618	1.44415	1.44540	0.15	0.00	0.09
	85	1.44419	1.4451	1.44392	0.01	0.07	-0.01
	100	1.44407	1.44436	1.44384	0.00	0.02	-0.02

<i>índice de refracción</i>							
Temperatura	Concentración	<i>Tamaño de cluster μm</i>			<i>Variación</i>		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
35	0	1.44208	1.44208	1.44208	-	-	-
	35	1.44326	1.44315	1.44284	0.08	0.07	0.05
	45	1.4421	1.44462	1.44215	0.00	0.18	0.00
	55	1.44373	1.44201	1.44336	0.11	0.00	0.09
	65	1.4442	1.44214	1.44342	0.15	0.00	0.09
	85	1.4422	1.44314	1.44186	0.01	0.07	-0.02
	100	1.44209	1.44237	1.44163	0.00	0.02	-0.03
40	0	1.4401	1.4401	1.4401	-	-	-
	35	1.44129	1.44119	1.44088	0.08	0.08	0.05
	45	1.44012	1.44264	1.44016	0.00	0.18	0.00
	55	1.44175	1.44002	1.44137	0.11	-0.01	0.09
	65	1.44221	1.44014	1.44144	0.15	0.00	0.09
	85	1.44022	1.44116	1.43977	0.01	0.07	-0.02
	100	1.44011	1.44039	1.43936	0.00	0.02	-0.05

<i>índice de refracción</i>							
Temperatura	Concentración	<i>Tamaño de cluster μm</i>			<i>Variación</i>		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
45	0	1.43811	1.43811	1.43811	-	-	-
	35	1.43932	1.43926	1.43891	0.08	0.08	0.06
	45	1.43813	1.44066	1.43817	0.00	0.18	0.00
	55	1.43979	1.43803	1.43938	0.12	-0.01	0.09
	65	1.44022	1.43814	1.43945	0.15	0.00	0.09
	85	1.43823	1.4392	1.43766	0.01	0.08	-0.03
	100	1.43812	1.4384	1.43704	0.00	0.02	-0.07
50	0	1.43612	1.43612	1.43612	-	-	-
	35	1.43733	1.43733	1.43694	0.08	0.08	0.06
	45	1.43615	1.43869	1.43619	0.00	0.18	0.00
	55	1.4378	1.43604	1.43740	0.12	-0.01	0.09
	65	1.43825	1.43616	1.43747	0.15	0.00	0.09
	85	1.43625	1.43722	1.43553	0.01	0.08	-0.04
	100	1.43614	1.43642	1.43473	0.00	0.02	-0.10

<i>índice de refracción</i>							
Temperatura	Concentración	<i>Tamaño de cluster μm</i>			<i>Variación</i>		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	<i>%</i>		
55	0	1.43413	1.43413	1.43413	-	-	-
	35	1.43535	1.43542	1.43495	0.09	0.09	0.06
	45	1.43417	1.43679	1.43421	0.00	0.19	0.01
	55	1.43583	1.43406	1.43541	0.12	0.00	0.09
	65	1.43628	1.43418	1.43548	0.15	0.00	0.09
	85	1.43425	1.43525	1.43339	0.01	0.08	-0.05
	100	1.43415	1.43444	1.43245	0.00	0.02	-0.12
60	0	1.43212	1.43212	1.43212	-	-	-
	35	1.43336	1.43353	1.43298	0.09	0.10	0.06
	45	1.43219	1.43492	1.43224	0.00	0.20	0.01
	55	1.43384	1.43206	1.43342	0.12	0.00	0.09
	65	1.4343	1.43222	1.43350	0.15	0.01	0.10
	85	1.43227	1.43327	1.43124	0.01	0.08	-0.06
	100	1.43217	1.43245	1.43018	0.00	0.02	-0.14

<i>índice de refracción</i>							
Temperatura	Concentración	Tamaño de cluster μm			Variación		
<i>K</i>	$\mu\text{mol/L}$	<i>5.9</i>	<i>8.7</i>	<i>12.7</i>	%		
65	0	1.43012	1.43012	1.43012	-	-	-
	35	1.43137	1.43164	1.43099	0.09	0.11	0.06
	45	1.43021	1.43303	1.43025	0.01	0.20	0.01
	55	1.43186	1.43008	1.43142	0.12	0.00	0.09
	65	1.43232	1.43024	1.43149	0.15	0.01	0.10
	85	1.43028	1.43128	1.42909	0.01	0.08	-0.07
	100	1.43018	1.43045	1.42796	0.00	0.02	-0.15